

**Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji**

PRACA DOKTORSKA

TEMAT: Wpływ warunku podobieństwa plastycznego
na dokładność modelowania fizycznego
procesów wyciskania

Marek Hawryluk

Słowa kluczowe: *kształtowanie plastyczne
modelowanie fizyczne
warunki podobieństwa
materiały modelowe*

Promotor

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

WROCŁAW, 2005

SPIS TREŚCI DYSERTACJI

1. WSTĘP.....	4
2. DOTYCHCZASOWY STAN ZAGADNIENIA.....	7
2.1. Modelowanie.....	7
2.2. Modelowanie procesów kształtowania plastycznego materiału.....	9
2.3. Modelowanie numeryczne	11
2.3.1. Koncepcja MES	12
2.3.2. Zastosowanie oraz ograniczenia MES.....	17
2.4. Modelowanie fizyczne	20
2.4.1. Warunki podobieństwa	21
2.4.2. Materiały modelowe.....	36
2.4.3. Badania właściwości materiałów modelowych.....	48
2.4.4. Zastosowanie modelowania fizycznego	52
2.4.5. Błędy i ograniczenia.....	57
2.5. Zjawisko tarcia oraz sposoby jego oceny w procesach kształtowania plastycznego materiału	63
2.5.1. Metody testowe dotyczące określenia wielkości tarcia.....	64
2.6. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie jako warunek podobieństwa plastycznego.....	69
3. PODSUMOWANIE BADAŃ LITERATUROWYCH.....	73
4. CEL BADAŃ I TEZA PRACY	74
5. METODYKA BADAŃ	76
5.1. Nowy opis warunku podobieństwa plastycznego w modelowaniu fizycznym.....	76
5.2. Laboratorium do modelowania fizycznego.....	78
6. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW RZECZYWISTYCH.....	84
6.1. Wybór reprezentatywnych procesów oraz dobór materiałów rzeczywistych	84
6.2. Wyznaczenie charakterystyk wybranych materiałów rzeczywistych	89
6.3. Wyznaczenie współczynnika tarcia	95
6.4. Zastosowanie metody invers do sprawdzenia poprawności wyznaczania krzywych umocnienia	97
6.4.1. Model analizy odwrotnej	98
6.5. Omówienie wyników badań wybranych procesów rzeczywistych.....	103
7. WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK MATERIAŁÓW MODELOWYCH – BAZA DANYCH	108
7.1. Opis próby.....	108
7.2. Wyniki badań	109
7.3. Metoda invers jako weryfikacja krzywych umocnienia dla materiałów modelowych	113
7.4. Analiza zachowania miękkich materiałów modelowych na bazie filii i plasteliny podczas odkształcania.....	115
8. DOBÓR MATERIAŁÓW MODELOWYCH.....	123
8.1. Określenie warunku podobieństwa plastycznego	123
8.2. Określenie warunków tribologicznych dla wybranych materiałów modelowych	129
9. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW KSZTAŁTOWANIA PLASTYCZNEGO PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW MODELOWYCH.....	131
9.1. Modelowanie fizyczne procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia .	131
9.2. Modelowanie fizyczne osiowosymetrycznego procesu wyciskania przeciwbieżnego	139
9.3. Numeryczna symulacja procesów rzeczywistych	147
9.3.1. Modelowanie numeryczne wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia.....	147
9.3.2. Modelowanie numeryczne osiowosymetrycznego procesu wyciskania przeciwbieżnego	150
10. PODSUMOWANIE.....	156
11. WNIOSKI.....	158
12. LITERATURA	160

1. WSTĘP

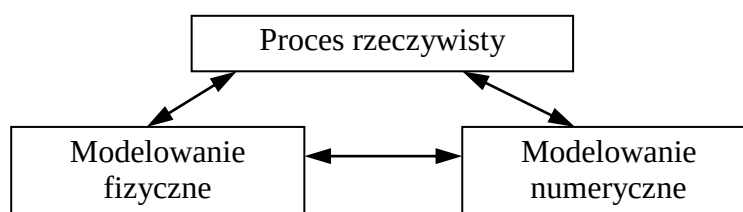
Projektowanie procesów kształtowania plastycznego wymaga przeprowadzania wielu prób i testów, co wiąże się z ogromnymi kosztami, jak również dużym nakładem czasu. Najważniejszym etapem projektowania jest ostateczna weryfikacja opracowanego procesu kształtowania plastycznego na materiale rzeczywistym. Na tej podstawie można stwierdzić, czy dany projekt nadaje się do zrealizowania, czy też nie. Dotychczas poprawność projektowanych procesów przeróbki plastycznej zależała głównie od zdolności i doświadczenia projektantów [53].¹¹

Obecnie poszukuje się metod, które ułatwiłyby z jednej strony projektowanie procesów przeróbki plastycznej, natomiast z drugiej strony wyeliminowałyby eksperyment na materiale rzeczywistym jako narzędzie weryfikujące [63, 83, 107]. Poszukiwania te prowadzone są w dwóch kierunkach. Pierwszy kierunek, oparty na aparacie matematycznym oraz nowych 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 przede wszystkim wspomnieć o metodzie elementów skończonych [99, 156]. 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 tę metodę. Pomimo niewątpliwej przydatności i nieuniknionego wdrażania modelowania numerycznego do analizy i projektowania procesów, należy pamiętać zarówno o potencjalnych możliwościach, jak też o ograniczeniach tej metody. Podstawowym ograniczeniem jest kierunek przepływu informacji. Podczas projektowania tradycyjnego, wychodząc od końcowego wyrobu oraz bazując na doświadczeniu i literaturze, projektant ustala sekwencje kolejnych operacji, kształty pośrednich półfabrykatów oraz parametry procesu. Natomiast podczas modelowania numerycznego, wychodząc z początkowego stanu materiału i przyjętych warunków brzegowych, uzyskuje się końcowy nie zawsze poprawny kształt wyrobu. Za pomocą modelowania numerycznego nie można więc w bezpośredni sposób ustalić, ani kolejności operacji, ani też kształtu pośrednich półfabrykatów. Można natomiast sprawdzać w sposób stosunkowo tani i szybki poprawność wcześniej dokonanych założeń. Poprzez kolejne próby i przybliżenia można optymalizować projektowany proces. Innym ograniczeniem modelowania numerycznego jest koszt modelowania oraz obsługi programów. Wprowadzenie nieliniowe zagadnienia można już rozwiązywać za pomocą programów działających na komputerach klasy PC, to jednak sprawne modelowanie, zwłaszcza złożonych

trójwymiarowych struktur, wymaga maszyn o dużej mocy obliczeniowej, a także obsługi potrafiącej wykorzystać możliwości oprogramowania. Jednakże podstawowym ograniczeniem w bezpośrednim wykorzystaniu numerycznego modelowania w procesie projektowania jest brak pewności, czy uzyskane wyniki są poprawne. Niepewność ta może być spowodowana przyjęciem błędnych założeń, niewłaściwego modelu lub błędów w obliczeniach, co powoduje, że uzyskane wyniki mogą być mniej lub bardziej zgodne z rzeczywistością. Pomimo, że modelowanie numeryczne zmienia rolę i zakres eksperymentu na rzeczywistym materiale to pozostaje on najdroższym i najbardziej czasochłonnym etapem projektowania [53, 85].

Okazuje się, że alternatywą dla weryfikacji modelowania numerycznego na rzeczywistym materiale może być metoda fizycznego modelowania, jako dużo tańsza i szybsza, która stanowi drugi kierunek w rozwoju metod wspomagających projektowanie procesów kształtowania plastycznego materiału.

Metoda ta może być samodzielnym narzędziem w projektowaniu i analizie procesów przeróbki plastycznej z uwzględnieniem zarówno kształtu, jak i właściwości gotowego wyrobu lub też współdziałać z modelowaniem numerycznym, dostarczając mu niezbędnych informacji dotyczących zachowania się odkształcanego materiału, warunków brzegowych i zmian strukturalnych oraz może pełnić rolę narzędzia weryfikującego [9, 58, 62, 64, 65]. Ponadto im dokładniejsze i pełniejsze dane są uzyskiwane w modelowaniu fizycznym, tym wirtualny model matematyczny procesu rzeczywistego budowany na bazie modelu fizycznego jest bardziej zbliżony do rzeczywistości. Na rys. 1.1 przedstawiono wzajemną zależność oraz przepływ informacji pomiędzy modelowaniem numerycznym, fizycznym i przemysłową aplikacją.



Rys. 1.1. Schemat przepływu informacji między modelowaniem numerycznym i fizycznym oraz rzeczywistym procesem

Modelowanie fizyczne pozwala uzyskać wiele informacji koniecznych do dokładnej analizy danego procesu przeróbki plastycznej. Doświadczenia wykazały, że uzyskane wyniki w modelowaniu fizycznym po prawidłowej transformacji odpowiadają rzeczywistym wartościom w danym procesie. Podczas modelowania fizycznego napotyka się jednak na wiele problemów, które mają wpływ na dokładność modelowania, dlatego prawidłowe jego zastosowanie wymaga dużego doświadczenia oraz wysokiej jakości zastosowanej aparatury.

Fizyczne modelowanie przy użyciu materiałów modelowych jest nie tylko rozwijane na uczelniach, ale także wiele przedsiębiorstw produkcyjnych posiada własne laboratoria do modelowania fizycznego [144, 147].

O poprawności fizycznego modelowania i możliwości transformacji wyników (sił, naprężeń, rozkładu odkształceń) z procesu fizycznego na rzeczywisty układ (proces przeróbki plastycznej) decyduje zachowanie warunków podobieństwa. Wykorzystuje się do tego zasady podobieństwa modelowego, wynikające m.in. z teorii podobieństwa, co umożliwia analizę wpływu różnych warunków prowadzenia procesu modelowego oraz różnych parametrów tego procesu na jego przebieg w warunkach rzeczywistych. Do najważniejszych warunków podobieństwa między modelem fizycznym a procesem rzeczywistym należą:

- podobieństwo materiału w zakresie plastycznym,
- podobieństwo geometryczne,
- podobieństwo warunków tarcia,
- podobieństwo materiału w zakresie sprężystym,
- podobieństwo termiczne.

O ile oddzielne spełnienie większości poszczególnych warunków podobieństwa nie stwarza większych problemów, o tyle jednoczesne spełnienie wszystkich warunków jest praktycznie niemożliwe [143, 144]. Jednym z najistotniejszych warunków jest warunek podobieństwa materiału w zakresie plastycznym, gdyż na tej podstawie dobierany jest materiał modelowy, symulujący zachowanie się rzeczywistego materiału metalicznego. Warunek ten sprowadza się do dobrania takiego materiału modelowego, którego kształt i charakter krzywej naprężenie uplastyczniające – odkształcenie jest najbardziej zbliżony do kształtu krzywej umocnienia materiału rzeczywistego [2, 6, 16, 17, 22-24, 28, 61, 62, 69, 71, 80, 94, 127, 148, 151].

Pomimo stosowania bardzo różnych materiałów modelowych okazuje się, że nie jest możliwe dobranie dla każdego materiału rzeczywistego odpowiedniego materiału modelowego, który spełniałby idealnie wszystkie warunki podobieństwa, w szczególności warunek podobieństwa plastycznego. **Zatem niezbędna staje się ocena dokładności modelu fizycznego danego procesu obróbki plastycznej w zależności od dokładności spełnienia warunków podobieństwa, zwłaszcza podobieństwa plastycznego.** Pozwoliłoby to już na etapie projektowania procesu zminimalizować ilość eksperymentów przeprowadzanych na materiałach modelowych oraz zdecydowanie poprawić wiarygodność uzyskiwanych wyników.

2. DOTYCHCZASOWY STAN ZAGADNIENIA

2.1. Modelowanie

Znaczna złożoność procesów, układów kinematycznych i realizowanych przez nie zadań dotyczących przeróbki plastycznej, wymusza często konieczność stosowania uproszczonych ich form, zwanych modelami.

Proces modelowania polega na stworzeniu pewnej struktury odzwierciedlającej badaną rzeczywistość, bądź też na opisie nowych niezbadanych zjawisk za pomocą znanych już definicji. Cechą charakterystyczną wszystkich modeli jest zdolność zastępowania badanego, realnego obiektu przez model, z którego uzyskane informacje mogą być przeniesione na rzeczywisty obiekt badań.

Proces modelowania [49] można podzielić na następujące etapy:

- przejście od obiektu (przedmiotu, systemu) rzeczywistego do jego modelu (sformułowanie modelu),
- badania eksperymentalne na modelu (badania symulacyjne – symulacja),
- przejście od modelu do oryginału, polegające na transformacji rezultatów badań na modelu na obiekt rzeczywisty (wyjaśnienie lub prognozowanie).

Modelowanie procesów umożliwia [76]:

- sprawdzenie teoretycznych założeń i wyciągnięcie wniosków dotyczących obiektu rzeczywistego,
- otrzymanie wytycznych do dalszych szczegółowych badań obiektu rzeczywistego,
- skrócenie czasu badań obiektu rzeczywistego,
- określenie metod testowania i ulepszania obiektu rzeczywistego,
- przeprowadzenie szczegółowych badań zmienności obiektu rzeczywistego oraz zmienności pochodnych z zewnątrz (np. sprzężenie zwrotne),
- łatwiejsze sterowanie obiektem rzeczywistym,
- znaczne obniżenie kosztów doświadczeń.

W literaturze spotkać można wiele klasyfikacji modeli [76, 91, 157], jednakże najczęściej modele dzielone są na:

- modele fizyczne,
- modele matematyczne.

Mogą być one również podzielone na:

- statyczne,
- dynamiczne.

Modele statyczne pomijają udział czasu w danym procesie lub też opisują jego stan chwilowy w dowolnie wybranym momencie. Model dynamiczny, uwzględnia natomiast wpływ czasu w modelowanym procesie. Dodatkowo prowadzi do ustalenia wzajemnych powiązań między stanami procesu w różnych momentach czasu.

Według innej klasyfikacji rozróżniane są modele deterministyczne i stochastyczne. Modele deterministyczne odnoszą się zazwyczaj do grupy obiektów posiadających jednoznacznie ustalone względem siebie logiczne lub matematyczne zależności. Prowadzi to do otrzymania jednoznacznego rozwiązania.

Modele stochastyczne posiadają przynajmniej część zmiennych o charakterze losowym, co kryje w sobie pewne niebezpieczeństwo uzyskania niepoprawnych wyników.

Modelowanie pomimo, że wyjaśnia wiele zagadnień związanych z samym obiektem lub procesem, może być obarczone znacznym błędem wynikającym z następujących problemów:

- Często cały wysiłek i czas modelującego mogą być zniweczone, jeżeli została wybrana nieodpowiednia metoda modelowania. Tylko właściwe wyważenie pomiędzy zastosowaną metodą a inwencją modelującego decyduje o końcowym sukcesie, a więc uzyskaniu poprawnego modelu dającego się zweryfikować w praktyce.
- Prawie każdy modelujący przystępując do modelowania uważa, że stworzony przez niego model jest najbliższy rzeczywistości. Taka sytuacja może mieć miejsce, kiedy badacz stracił bardzo dużo czasu przy tworzeniu modelu i nie uzyskał poprawnego wyniku lub dążąc do uzyskania sukcesu będzie nieświadomie stosował uproszczenia oddalające model od obiektu.
- Zbyt często własnemu modelowi przypisuje się nadmierną uniwersalność stosowania, co może wynikać ze zbyt pobieżnego rozeznania obiektu lub procesu oraz znalezienia cech „pseudowspólnych” dla podobnego obiektu/procesu. Przed każdym użyciem istniejącego modelu do opisu nowego procesu celowa byłaby statystyczna ocena wyników modelowania (np.: poprzez wyznaczenie przedziałów ufności). Często okazuje się, że lepiej jest zbudować nowy model od początku, gdyż adaptacja znanego modelu do nowego procesu może prowadzić do błędnych wyników i straty czasu.

2.2. Modelowanie procesów kształtowania plastycznego materiału

Analiza procesów obróbki plastycznej wymaga ujęcia związków między naprężeniem a odkształceniem w sposób ilościowy i nadania im określonych form zależności matematycznych, a jest to możliwe jedynie po przyjęciu pewnego modelu ciała plastycznego. Konsekwencją takiego traktowania ciał rzeczywistych jest konieczność wyrażenia ich własności za pomocą pojęć właściwych dla przyjętego modelu ciała to jest: naprężeń i odkształceń [49].

Coraz większe wymagania stawiane procesom przeróbki plastycznej wymagają stosowania coraz doskonalszych metod analizy, zarówno pod względem mechanicznym, fizycznym, jak również fizykochemicznym.

Analiza procesów obróbki plastycznej powinna obejmować:

- opis matematyczny procesu,
- rozwiązanie układu równań jednym z poniższych sposobów:
 - a) analitycznie,
 - b) numerycznie,
 - c) doświadczalnie.

Według Polańskiego [103] **model matematyczny**, rozumiany jest najczęściej jako układ równań różniczkowych opisujących zasady danego zjawiska wraz z warunkami brzegowymi charakterystycznymi dla tego zjawiska.

Układy równań przekształca się najczęściej przy pomocy analizy wymiarowej i teorii podobieństwa do postaci bezwymiarowych – **rozwiązanie analityczne**. Następnie określa się warunki modelowania, które gwarantują uzyskanie podobieństwa procesu modelowego do rzeczywistego.

Obecny bardzo szybki rozwój technik komputerowych pozwala rozwiązywać takie układy równań dla bardzo złożonych zjawisk za pomocą **modelowania numerycznego**, najczęściej przy pomocy MES.

Jednakże nadal pozostaje jeszcze wiele procesów, dla których rozwiązania te są niejednoznaczne lub obarczone dużym błędem. Wówczas możliwe jest rozwiązanie układu równań różniczkowych metodą doświadczalną. Doświadczalne rozwiązanie układu równań określa się mianem **modelowania fizycznego**.

W przypadku modelowania, zwłaszcza fizycznego należy wspomnieć również o analizie wymiarowej i teorii podobieństwa, które są wykorzystywane przy budowaniu i określaniu zależności oraz warunków podobieństwa między modelem a rzeczywistością. Obie metody opierają się na wynikach uzyskanych z przeprowadzonych eksperymentów i obliczeń.

Analiza wymiarowa wykorzystywana jest wszędzie tam, gdzie utworzenie matematycznego opisu zjawiska nie jest możliwe. Metody analizy wymiarowej pozwalają uprościć znacznie badania oraz uogólnić je przez przejście od wielkości wyrażonych w określonych jednostkach miary do wielkości bezwymiarowych, które z dużym prawdopodobieństwem opisują dany proces.

W przypadku zastosowania analizy wymiarowej muszą być znane wielkości $x_1 \dots x_{n-1}$, które charakteryzują dany proces oraz wpływają na wskaźnik wymiarowy. Wielkości te mogą być bezwymiarowe lub mogą być wyrażone w określonych jednostkach miary z dowolnego systemu miar. Bezwymiarowymi nazywane są takie wielkości, dla których wartości są jednakowe we wszystkich możliwych układach miar. W analizie wymiarowej zakłada się, że konotacje między wielkościami $x_1 \dots x_{n-1}$ oraz y nie zależą od przyjętego układu jednostek miar. Zatem znajdując kompleksową zależność pomiędzy wielkościami bezwymiarowymi można zastąpić zależność wskaźnika y od wielkości $x_1 \dots x_{n-1}$. Kompleksowa zależność pomiędzy wielkościami bezwymiarowymi jest o wiele łatwiejsza do badań, gdyż zawiera znacznie mniejszą liczbę zmiennych oraz nie występuje w niej skala w postaci jawnej.

W przypadku użycia analizy wymiarowej, do wnioskowania o konkretnym procesie przeróbki plastycznej, postępuje się według schematu:

- Jednostkę miary każdej wielkości należy wyrazić za pomocą jednostek podstawowych danego układu miar.
- Należy założyć, że pewne wielkości spośród $x_1 \dots x_{n-1}$ można przegrupować w bezwymiarowe wielkości $z_1 \dots z_k$.
- W przypadku, kiedy wielkości bezwymiarowych nie daje się utworzyć to cały zestaw zmiennych uzupełnia się stałymi parametrami (np.: prędkość światła, przyspieszenie ziemskie, stała gazowa, liczba molowa, itp.).
- Buduje się wzór wymiarowy, który może być zdefiniowany jako zależność jednostek miary wielkości pochodnej od jednostek miary wielkości podstawowych.

Modelowanie z wykorzystaniem **teorii podobieństwa** opiera się na rozpatrywaniu zjawisk fizycznie podobnych, które łatwiej zrealizować w praktyce [118]. Często, bowiem przed badaczem podejmującym próbę modelowania, pojawia się problem znajomości matematycznego opisu procesu oraz trudności wykonania na podstawie tego modelu niezbędnych obliczeń. W tym przypadku matematyczny model wykorzystywany jest do wyznaczania kompleksowych wielkości bezwymiarowych, metodami wynikającymi z teorii

podobieństwa. Według Siedowa [118] warunkiem koniecznym i dostatecznym podobieństwa dwóch zjawisk jest niezmienność liczbowych wartości iloczynów bezwymiarowych tworzących tzw. podstawę. Stanowią ją te wielkości bezwymiarowe, które określają wszystkie pozostałe wielkości zjawiska. Na przykład w przeróbce plastycznej model konkretnego procesu np.: walcowania, tłoczenia, kucia, itd. można wykonać zachowując podobieństwo geometryczne, które określa współczynnik podobieństwa, czyli skalę. Znając skalę oraz wielkości charakterystyczne modelu można otrzymać wielkości rzeczywistego procesu za pomocą stosunkowo prostych obliczeń [91]. Pomimo powyższych stwierdzeń świadczących o prostocie modelowania, teoria podobieństwa nastrocza wiele trudności przy zachowaniu podobieństwa zjawisk lub procesów przeróbki plastycznej, zwłaszcza w praktyce przemysłowej [76].

Za pomocą analizy wymiarowej oraz teorii plastyczności i teorii podobieństwa, wprowadzając równania kryterialne określa się kryteria lub warunki podobieństwa, które służą do poprawnego prowadzenia modelowania procesów kształtowania plastycznego.

2.3. Modelowanie numeryczne

W ostatnich 30 latach liczba użytkowników stosujących komputerowe metody obliczeniowo-projektowe znacznie się zwiększyła, a stosowanie komputerowego wspomagania stało się opłacalne nawet dla małych przedsiębiorstw. Do połowy lat osiemdziesiątych z metod komputerowego wspomagania: prac inżynierskich (CAE), projektowania (CAD) i wytwarzania (CAM) korzystały jedynie bardzo duże przedsiębiorstwa i to w ograniczonym zakresie [108]. Ich wykorzystanie w bardzo istotnym stopniu skraca czas potrzebny do uruchomienia produkcji nowego lub zmodernizowanego wyrobu.

Obecnie najpowszechniej stosowanym, obok metod fizycznego modelowania, narzędziem w symulacjach oraz analizie procesów jest modelowanie numeryczne przy użyciu MES. Metoda elementów skończonych jest jedną z wielu metod przybliżonych, które mogą być stosowane w rozwiązywaniu zagadnień brzegowo-początkowych mechaniki.

Oprócz popularnie stosowanej metody elementów skończonych, dość powszechnym trendem – występującym głównie w środowisku naukowym – jest poszukiwanie nowych metod modelowania procesów kształtowania plastycznego materiału. Od nowo powstających modeli numerycznych oczekuje się przede wszystkim dużej szybkości analizy wybranych aspektów modelowanego procesu (niejednokrotnie kosztem zmniejszenia dokładności obliczeń).

Są to specjalistyczne narzędzia badawcze, które pozwalają uzyskać najistotniejsze informacje o analizowanym procesie. Przykładem takich metod numerycznych mogą być tzw. sekwencyjne techniki analizy, które bazują na dobrze znanych metodach inżynierskich oraz teorii plastyczności (np. metoda energetyczna, metoda górnej oceny, metoda linii poślizgu) [111, 152].

Ostatnio coraz poważniejszą konkurencję (szczególnie w dziedzinie rozwiązywania zagadnień liniowych) stanowi dla MES tzw. metoda elementów granicznych (MEG). U podstaw MEG leży dokładne lub przybliżone rozwiązanie wyjściowego układu równań różniczkowych i otrzymanie zależności wiążących szukane funkcje tylko na granicy badanego obszaru. W odróżnieniu od MES, dyskretyzacji podlega, przy wykorzystaniu MEG, tylko powierzchnia analizowanego obszaru, co stanowi najważniejszą zaletę MEG w porównaniu z innymi metodami numerycznymi.

2.3.1. Koncepcja MES

W metodzie MES zakłada się, że każdą wielkość (np. przemieszczenie, naprężenie) można opisać za pomocą funkcji pierwotnej (ciągłej) w danym podobszarze. Wymaga to stworzenia modelu dyskretnego, który jest złożony ze zbioru funkcji ciągłych określonych w skończonej liczbie podobszarów, zwanych elementami, na jakie podzielono rozpatrywany obszar, który można przedstawić w postaci równania:

$$\Omega = \sum_{i=1}^{ITA} \Omega_i, \quad (2.3.1.1)$$

gdzie: Ω – zbiór funkcji ciągłych całego obszaru,
 Ω_i – zbiór funkcji ciągłych poszczególnych podobszarów.

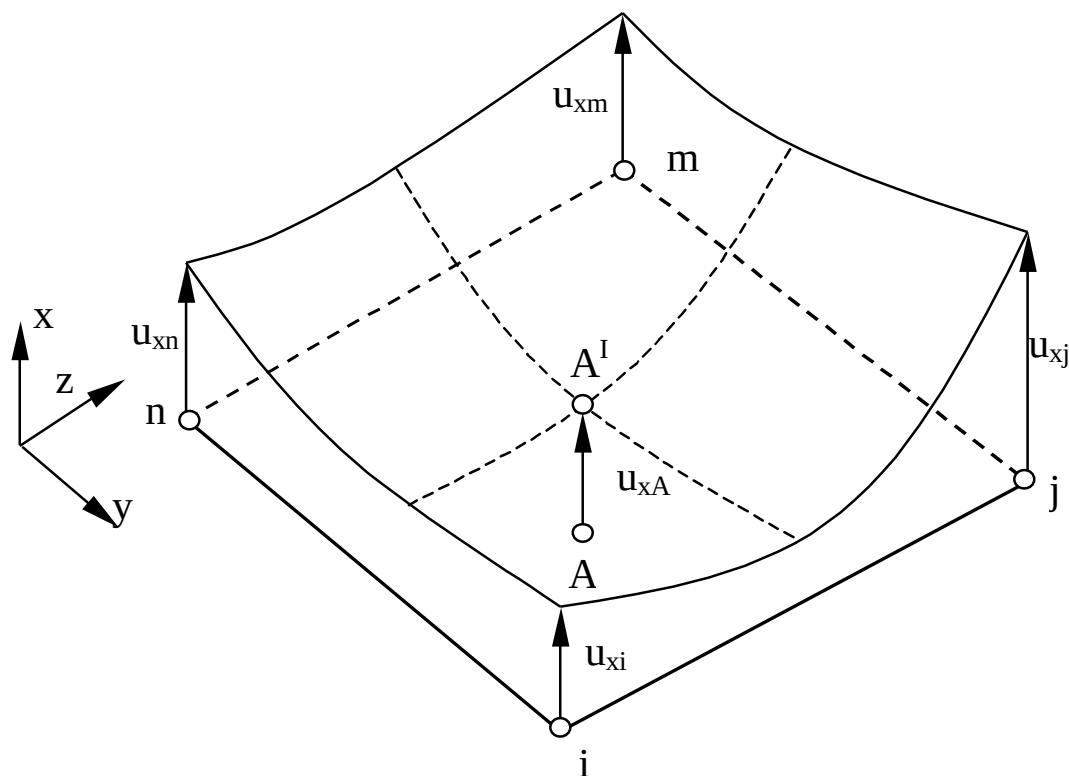
Poszczególne funkcje ciągłe z podobszarów definiuje się przez wartości funkcji pierwotnej w skończonej liczbie punktów z wnętrza rozważanego obszaru, zwanych węzłami.

W celu zbudowania modelu dyskretnego procesu fizycznego należy:

- podzielić rozpatrywany obszar na skończoną liczbę elementów (elementy łączą się ze sobą we wspólnych węzłach, a ich zbiór musi pokrywać cały obszar),
- określić w węzłach elementów wielkości fizyczne, które będą aproksymowane np. przemieszczenie, naprężenie,
- aproksymować wielkości fizyczne w oparciu o ich wartości w węzłach elementów za pomocą funkcji aproksymujących (np. wielomiany, szeregi); funkcje takie nazywane są funkcjami kształtu.

Na przykład, jeżeli jest rozpatrywana jedna wielkość fizyczna dla jednego elementu (przeszyczenie w kierunku osi x) w punkcie A , wyraża się ją przez wartości węzłowe za pomocą zależności (rys. 2.3.1.1)

$$u_{xA}(x, y, z) = \sum_n^{IE} N_n(x, y, z) u_{xn}, \quad (2.3.1.2)$$



Rys. 2.3.1.1. Aproksymacja przeszczenia w punkcie A we wnętrzu wybranego elementu skończonego

Równanie (2.3.1.2) w zapisie macierzowym ma postać

$$\{u\} = [N_e] \{V_e\}, \quad (2.3.1.3)$$

gdzie: $[N_e] = [N_1, N_2, \dots, N_{IE}]$ – macierz funkcji kształtu elementu,

IE – liczba węzłów opisujących element skończony,

$$\{V_e\} = \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{xIE} \end{Bmatrix} - \text{wektor wielkości węzłowych elementu, np. przeszczeń.}$$

Dla wszystkich elementów, na które został podzielony obszar, muszą być spełnione warunki równowagi. Równowaga ta będzie całkowita tylko wtedy, gdy zapewni się równość

pracy wirtualnej dla wszystkich dowolnych wariacji przemieszczeń, przy zadanych warunkach brzegowych. Zgodnie z metodą Ritza całkowita energia potencjalna układu jest sumą wariacji energii odkształcenia E oraz wariacji energii potencjalnej sił zewnętrznych W [156]

$$U = E + W \quad (2.3.1.4)$$

W ogólnej postaci całkowita energia potencjalna całego układu przyjmuje postać:

$$U = \underbrace{\int_V d\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV}_E - \underbrace{\left[d\left(\{V_e\}^T \{R\}\right) + \int_V d\left(\{f\}^T \{p\}\right) dV + \int_S d\left(\{f\}^T \{q\}\right) ds \right]}_W, \quad (2.3.1.5)$$

gdzie: $\{p\}$ – rozłożenie obciążenia od sił masowych,

$\{q\}$ – obciążenie ciągłe,

$\{R\}$ – siły zewnętrzne,

$\{V_e\}$ – składowe przemieszczeń węzłowych,

$\{f\}$ – przemieszczenia dowolnego punktu,

$\{\varepsilon\}$ – odkształcenia,

$\{\sigma\}$ – naprężenia.

Następnie całkowitą energię potencjalną całego układu poddaje się procesowi minimalizacji

$$dU = d(E + W) = 0, \quad (2.3.1.6)$$

Zależność ta sprowadza się do postaci

$$\left\{ \frac{\delta U}{\delta \{V\}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\delta U}{\delta V_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\delta U}{\delta V_n} \end{array} \right\} = 0. \quad (2.3.1.7)$$

Jest to układ równań różniczkowych, których rozwiązaniem są poszukiwane wielkości. Niezbędnym warunkiem uzyskania żądanej dokładności jest przyjęcie funkcji kształtu w elemencie dokładnie opisującej rzeczywiste poszukiwane wielkości.

Metodą elementów skończonych, za pomocą prostych geometrycznie elementów skończonych, buduje się modele dyskretne złożonych konstrukcji nośnych z wszelkimi zaokrągleniami i nieciągłościami. MES jest metodą konsekwentnego poszukiwania przybliżonych rozwiązań problemów brzegowych. Metoda ta pierwotnie rozwijana była do rozwiązywania zagadnień w zakresie odkształceń sprężystych, następnie zaczęto ją również stosować w zakresie odkształceń plastycznych pomimo trudności wynikających z następujących dwóch faktów:

I. Związki przyrostowe „naprężenie – odkształcenia”

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep}^* d\{\varepsilon\}, \quad (2.3.1.8)$$

gdzie:

$$[D]_{ep}^* = [D] - [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D] \left[A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T \cdot [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \right]^{-1}, \quad (2.3.1.9)$$

macierz sprężysto – plastyczna

są ważne tylko do chwili, gdy naprężenie osiągnie powierzchnię plastyczności $F = 0$.

II. Związek (2.3.1.8) jest prawdziwy tylko dla znikomo małych przyrostów odkształceń [156].

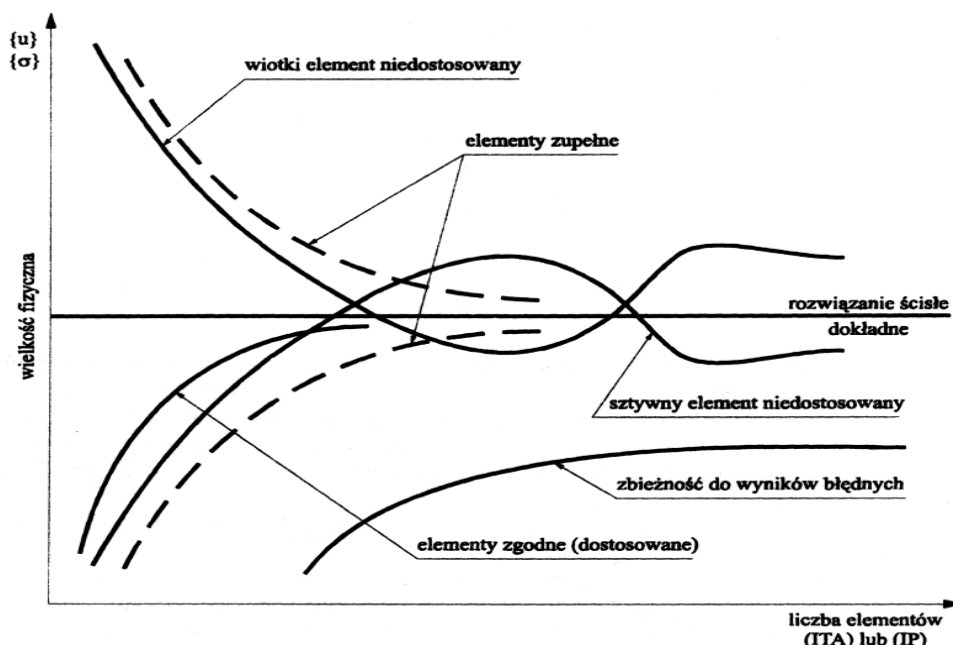
Przy modelowaniu układu rzeczywistego bardzo ważnym etapem jest przejście od modelu fizycznego lub geometrycznego ciągłego do dyskretnego tak, aby model dyskretny dostatecznie dokładnie odzwierciedlał zjawiska zachodzące w modelu fizycznym.

Niezbędnym warunkiem otrzymania żądanej dokładności modelowania MES jest przyjęcie funkcji kształtu dostatecznie dokładnie odwzorowujących rzeczywiste wielkości fizyczne w elemencie. Przy spełnieniu tego warunku i coraz gęstszym podziale obszaru na elementy otrzymane wyniki mogą się zbliżać do rozwiązania dokładnego. Funkcje kształtu muszą również zapewniać:

- ciągłość przemieszczeń wewnątrz elementu oraz ich zgodność na granicach elementów; jest to kryterium zgodności,
- możliwość opisywania stałych przemieszczeń elementu $\{u\} = \text{const}$, a więc jego ruchu jako ciała sztywnego, czyli funkcja kształtu musi być tak dobrana, aby podczas ruchu elementu jako ciała sztywnego, nie powstawały w nim naprężenia,
- możliwość opisu stanu stałych odkształceń $\{\varepsilon\}_{el} = \text{const}$ (a tym samym naprężeń $\{\sigma\} = \text{const}$) wewnątrz elementu, występującego przy odpowiednich przemieszczeniach węzłów; jest to kryterium stałych odkształceń.

Elementy, w których funkcje kształtu spełniają pierwszy warunek (a) nazywa się elementami zgodnymi (dostosowanymi), a elementy, które spełniają tylko warunki drugi i trzeci (b i c) nazywa się elementami zupełnymi (niedostosowanymi).

Przyjęcie do dyskretyzacji elementów zgodnych zapewnia zbieżność rozwiązania modelu dyskretnego od dołu, co pokazano na rys. 2.3.1.2.



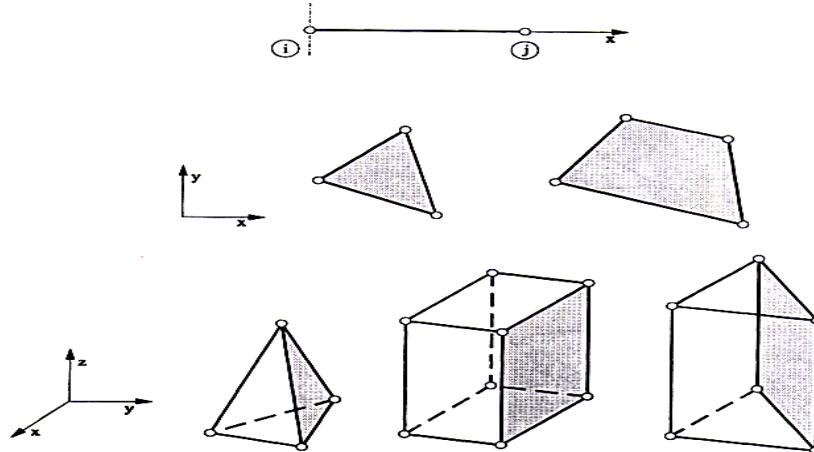
Rys. 2.3.1.2. Wpływ liczby elementów skończonych na wartość dyskretyzowanej wielkości fizycznej $\{u\}$

W przypadku stosowania elementów zupełnych nie zawsze jest zapewniona monotoniczna zbieżność rozwiązań wraz ze zwiększeniem liczby elementów. Można ją uzyskać dopiero po spełnieniu warunku ciągłości odkształceń na brzegach elementów. Jednak nawet przy niespełnieniu tego warunku dokładność rozwiązań jest zazwyczaj wystarczająca do celów praktycznych. O tym, czy element jest zgodny, czy zupełny decyduje przyjęta funkcja kształtu elementu.

Obecnie, gdy metoda elementów skończonych jest powszechnie stosowana, istnieje bardzo dużo różnych typów elementów skończonych i w dalszym ciągu wprowadzane są nowe. Poszczególne typy elementów skończonych charakteryzuje cały zespół cech. Ze względu na dużą liczbę tych cech, poszczególnym typom elementów skończonych nadaje się czasami niewiele mówiące nazwy. W tej sytuacji dopiero nazwa i dołączony do niej zespół cech pozwala określić właściwości danego typu elementu skończonego.

W celu określenia typu elementu skończonego wprowadzane są kryteria pozwalające określić jego cechy. Do podstawowych kryteriów zaliczamy:

- a) wymiar elementu: jednowymiarowy (1-D), dwuwymiarowy (2-D), trójwymiarowy (3-D), (rys. 2.3.1.3),
- b) kształt geometryczny (punktowe, odcinkowe, trójkątne, czworokątne, wielokątne, czterościenne, pięciościenne, prostopadłościenne, osiowosymetryczne),
- c) typ i stopień wielomianu przyjętej funkcji kształtu,
- d) liczbę węzłów w elemencie,
- e) więzy ogólne nałożone na element.



Rys. 2.3.1.3. Schematy ideowe elementów skończonych: 1-D, 2-D, 3-D

2.3.2. Zastosowanie oraz ograniczenia MES

Metoda elementów skończonych umożliwia rozwiązywanie wielu zagadnień statycznych i dynamicznych uwzględniających nieliniowości geometryczne i fizyczne. Do typowych zadań należą [120]:

- ✓ statyczne i dynamiczne próby wytrzymałościowe elementów maszyn,
- ✓ symulacje prób zderzeniowych pojazdów samochodowych oraz obciążeń uderowych elementów pojazdów,
- ✓ symulacje działania siły uderzeniowej na elementy opancerzenia w technice wojskowej,
- ✓ symulacje i analiza procesów kształtowania plastycznego, zarówno procesów technologicznych jak i analiza zachowania się projektowanych wyrobów,
- ✓ symulacje zjawisk i mikrostruktury materiału,
- ✓ analiza przepływów, elektromagnetyzm, itp.

Metoda elementów skończonych jest również pomocna podczas projektowania i optymalizacji wielu innych procesów produkcyjnych. W ostatnich latach pojawiło się bardzo dużo aplikacji i pakietów obliczeniowych opartych o MES. Do najpopularniejszych obecnie

programów do symulacji i analizy procesów przeróbki plastycznej zaliczyć można (pakiety): MARC MENTAT, SUPERFORGE, AUTO/FORGE, FORGE, SUPERFORM, MSC/DYTRAN, PAM-STAMP, PAM-CRASH, DYNAFORM, ABAQUS, DEFORM, ACTION, LS-DYNA3D, NIKE 3D i inne.

Zastosowanie poszczególnych pakietów obliczeniowych w procesach kształtowania plastycznego materiału jest bardzo rozległe. Od najprostszych symulacji w płaskich stanach odkształcenia, np: procesu spęczania próbki walcowej [67] poprzez mikro-kształtowanie plastyczne [106], symulacje mikrostruktury materiału [78, 93], projektowanie procesów technologiczno-produkcyjnych [95], aż do symulowania skomplikowanych pod względem kształtu i warunków obciążenia przestrzennych konstrukcji samochodowych [109], lotniczych [139], a nawet modułów statku kosmicznego [1, 15]. Obszerny przegląd prac na temat zastosowania MES w badaniach procesów przeróbki plastycznej metali zawarty jest w pracy [142].

Duża popularność metody elementów skończonych wynika z jej uniwersalności oraz coraz łatwiejszej obsługi programów i aplikacji opartych na tej metodzie. Wysoko rozwinięte firmy produkcyjne przeznaczają znaczące środki finansowe na numeryczne modelowanie procesów technologicznych. Głównym tego celem jest obniżenie kosztów wdrożeniowych nowego produktu poprzez eliminację wad i optymalizację stosowanych rozwiązań już na etapie projektowania, co pozwala na ograniczenie stosowania znacznie bardziej kosztownych badań eksperymentalnych.

Pomimo bezdyskusyjnej przydatności metod numerycznych do analizy i optymalizacji procesów, należy mieć świadomość zarówno o ich potencjalnych możliwościach, jak i o ograniczeniach oraz wadach.

Ograniczeniem w wykorzystaniu MES jest kierunek przepływu danych. Wychodząc, bowiem z początkowego stanu materiału i przyjętych warunków brzegowych, okazuje się, że finalny kształt wyrobu nie zawsze jest poprawny. Wynika stąd, że przy pomocy metod numerycznego modelowania nie można w bezpośredni sposób określić np.: kształtu pośrednich półfabrykatów, czy też ustalić kolejności poszczególnych operacji kształtowania plastycznego materiału. Dopiero poprzez kolejne próby symulacyjne i przybliżenia można optymalizować projektowany proces technologiczny [88, 95, 137, 140]. Dużym ograniczeniem jest konieczność posiadania dokładnego opisu właściwości kształtowanego materiału oraz zjawisk towarzyszących odkształcaniu. Ogromnie pomocna w takich przypadkach, jak również przy wyznaczaniu wielu współczynników układów równań, uwzględniając niejednorodności pola odkształceń i temperatury jest metoda invers [51, 81, 100, 136, 138].

Często, zbyt duża uniwersalność komercyjnych programów utrudnia poprawny opis zjawisk fizycznych, termicznych, przemian fazowych i innych. Stosowanie daleko idących uproszczeń prowadzi często do znacznych różnic pomiędzy modelem rzeczywistym a numerycznym. Dlatego wiele ośrodków badawczo-naukowych rozbudowuje istniejące pakiety obliczeniowe lub tworzy własne programy/aplikacje na potrzeby opisu konkretnych zjawisk.

Jednym z największych problemów w MES jest zamodelowanie zniszczenia materiału. Opracowanie optymalnego, ilościowego kryterium pęknięcia materiałów w plastycznej przeróbce metali, dającego dobre wyniki jakościowe jest obecnie przedmiotem wielu badań [1, 27, 41, 77, 90, 93, 137, 140]. O ile większość programów komercyjnych jest w stanie symulować wady wynikające z anizotropii materiału, pofałdowania, czy wyboczenia, o tyle problem pojawia się przy utracie stateczności prowadzącej do pęknięcia kształtowanego materiału [110]. Dużym ograniczeniem jest brak miarodajnych kryteriów weryfikacji wyników symulacji numerycznych dotyczących procesów bazujących na ścinaniu [41], czy wykrawaniu [77]. Wynika to przede wszystkim z niezgodności geometrii strefy ścinania uzyskiwanej na drodze symulacji komputerowych z geometrią uzyskiwaną doświadczalnie.

Bardzo istotny w symulacjach numerycznych procesów kształtowania plastycznego jest również problem określenia warunków tribologicznych. Okazuje się, że w dużej liczbie symulacji metodą elementów skończonych przyjęcie właściwego modelu i poprawnych warunków tarcia naraża wiele kłopotów [58, 64, 105, 123].

Wysokie koszty modelowania numerycznego oraz obsługi komercyjnych pakietów obliczeniowych stanowią również ograniczenie MES. Wprowadzenie nieliniowych zagadnień można już rozwiązywać za pomocą programów działających na komputerach klasy PC, to jednak sprawne modelowanie, zwłaszcza złożonych trójwymiarowych struktur, wymaga maszyn o dużej szybkości i dużej pamięci [78]. To z kolei pociąga za sobą konieczność kupna drogich terminali i jednostek roboczych oraz specjalistycznego sprzętu komputerowego. Dobra znajomość i sprawna obsługa programów komercyjnych wymaga także przeprowadzenia szeregu kursów i szkoleń, które są kosztowne i czasochłonne.

Ograniczenie stanowi również dokładność MES, która zależy w dużym stopniu od zastosowanej siatki elementów skończonych, od jej gęstości, kształtu elementów oraz sposobu aproksymacji. Zagęszczanie siatki z jednej strony powoduje zwiększanie dokładności obliczeń, z drugiej natomiast zwiększanie czasu potrzebnego na przeprowadzenie obliczeń. Dlatego niezbędny jest dobór optymalnej gęstości, która pozwoli uzyskać poprawny wynik w jak najkrótszym czasie. Odpowiedni wybór parametrów siatki elementów skończonych

takich jak: zagęszczenie i kształt elementów oraz postać funkcji kształtu, zależy w dużym stopniu od pomysłowości i doświadczenia projektanta.

Ograniczeniem MES jest także fakt, że poprzez skupienie sił równoważących w węzłach, warunki równowagi spełnione są tylko w odniesieniu do całego układu. Zazwyczaj występują lokalne odchylenia od warunków równowagi wewnątrz poszczególnych elementów oraz na ich granicach. Wadą metody elementów skończonych jest również to, że otrzymywane wyniki leżą poniżej wartości rzeczywistych, co spowodowane jest minimalizacją całkowitej energii układu.

Jednakże podstawowym ograniczeniem w bezpośrednim wykorzystaniu MES w procesach projektowania, stanowi brak weryfikacji otrzymywanych wyników. Mimo, że modelowanie numeryczne jest obecnie powszechnie stosowaną metodą, dającą na ogół zadowalającą zgodność z rzeczywistością, z racji przedstawionych ograniczeń, jak również w celu większej wiarygodności uzyskiwanych wyników niezbędna staje się jego weryfikacja. Rzeczywiste eksperymenty są najdroższą formą sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników i przyjętych założeń. Dlatego niezbędne jest poszukiwanie innych, alternatywnych sposobów oraz metod umożliwiających dobrą i taną weryfikację obliczeń numerycznych. Obecnie szeroko stosowane są w tym celu metody fizycznego modelowania i symulacji fizycznych, jako dużo tańsze i prostsze, a niekiedy zdecydowanie szybsze w porównaniu do MES. Coraz częściej do analizy i projektowania procesów kształtowania plastycznego materiału wykorzystuje się równocześnie MES i modelowanie fizyczne [58, 84, 93, 119, 135, 140]. Ponadto poprzez wzajemną weryfikację modelowania numerycznego i metod fizycznego modelowania procesów kształtowania plastycznego materiału możliwe staje się zminimalizowanie rzeczywistego eksperymentu, a nawet całkowite jego wykluczenie.

2.4. Modelowanie Fizyczne

Z poprzednich rozdziałów wynika, że do projektowania i analizy rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego stosuje się najczęściej modelowanie numeryczne wykorzystujące MES. Jednakże wyniki uzyskane z MES mogą być obarczone trudnym do oszacowania błędem, dlatego konieczne staje się porównanie uzyskanych wyników z rzeczywistym procesem, którego alternatywą może być metoda fizycznego modelowania jako dużo tańsza i szybsza, dostarczająca dodatkowo szereg informacji dotyczących np.: warunków brzegowych.

Podstawową ideą modelowania fizycznego jest zastąpienie materiału rzeczywistego w danym procesie przeróbki plastycznej przez miękkie materiały np. glinę, plastelinę, woski

oraz specjalne mieszaniny oparte na tych składnikach, o granicy plastyczności mniejszej od 100 do 1000 razy od granicy plastyczności materiału rzeczywistego [85, 148]. Modelowanie fizyczne poprzez użycie tańszych narzędzi wykonanych z innego materiału niż stal, np.: z aluminium, drewna, tworzywa sztucznego, gumy i materiałów przezroczystych oraz stosowanie pras o dużo mniejszych naciskach, niż w procesach rzeczywistych pozwala na szybką, dokładną i taną analizę rzeczywistych procesów przeróbki plastycznej [9]. Metoda ta umożliwia określenie rozkładu odkształceń i naprężeń, wyznaczenie obciążenia narzędzi i maszyn, ustalenie sposobu wypełnienia wykroju matrycy, lokalizację martwych stref oraz błędów płynięcia, a także określenia parametrów siłowych danego procesu.

Za początek modelowania fizycznego można przyjąć rok 1860, kiedy H. Treska przeprowadził pierwszy eksperyment wyciskania i kucia plasteliny i gliny [141]. Od tamtego czasu coraz chętniej sięgano po ten rodzaj modelowania, udoskonalając i rozszerzając je na inne procesy, nie tylko dotyczące plastycznej przeróbki metali.

Wieloletnie badania wykazały, że uzyskane wyniki w modelowaniu fizycznym po prawidłowej transformacji można z powodzeniem przenieść na rzeczywiste procesy. Podczas modelowania fizycznego napotyka się jednak na wiele problemów, które mają niekiedy istotny wpływ na dokładność modelowania, dlatego prawidłowe jego wykorzystanie wymaga dużego doświadczenia oraz zastosowania specjalistycznej aparatury badawczej.

2.4.1. Warunki podobieństwa

O poprawności fizycznego modelowania i możliwości poprawnej transformacji wyników z procesu fizycznego decyduje zachowanie warunków podobieństwa między modelem fizycznym a procesem rzeczywistym [8, 9, 14, 46, 47, 148].

Najważniejsze z nich to:

- **podobieństwo materiału w zakresie plastycznym,**
- **podobieństwo geometryczne,**
- **podobieństwo termiczne,**
- **podobieństwo warunków tarcia,**
- **podobieństwo materiału w zakresie sprężystym,**
- **podobieństwo dynamiczne.**

Warunek podobieństwa materiału w zakresie plastycznym

Najważniejszym warunkiem dla procesów przeróbki plastycznej jest warunek podobieństwa materiału w zakresie plastycznym (dotyczący bezpośrednio krzywej

plastyczności materiału modelowego), gdyż na tej podstawie dobierany jest materiał modelowy, symulujący zachowanie się rzeczywistego materiału metalicznego. Warunek podobieństwa w zakresie plastycznym jest spełniony, gdy materiał modelowy podczas odkształcania zachowuje się tak samo, jak materiał rzeczywisty. Ponieważ o zachowaniu się materiału podczas odkształcania decyduje krzywa umocnienia, warunek ten można sprowadzić do dobrania odpowiedniej krzywej umocnienia materiału modelowego. W przypadku przeróbki plastycznej na zimno, wpływ prędkości odkształcania na naprężenie uplastyczniające jest tak niewielki, że może być pominięty. Wówczas naprężenie uplastyczniające jest opisane funkcją dwóch zmiennych: odkształcenia i temperatury. Temperatura może być również pominięta, gdy proces przebiega w warunkach izotermicznych. Przykładowym równaniem opisującym krzywą umocnienia dla takich warunków jest równanie Hollomona [70]:

$$\sigma = C\varepsilon^n. \quad (2.4.1.1)$$

Warunek podobieństwa plastycznego jest spełniony wówczas, gdy współczynnik umocnienia dla materiału modelowego n_m i rzeczywistego n_r jest taki sam:

$$n_m = n_r. \quad (2.4.1.2)$$

W przypadku przeróbki plastycznej na gorąco należy uwzględnić, zarówno odkształcenie, jak i prędkość odkształcania. Wówczas do opisu naprężenia uplastyczniającego możemy zastosować równanie Aldera i Phillipsa [5]:

$$\sigma = C\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m. \quad (2.4.1.3)$$

gdzie: C – stała materiałowa,
n – współczynnik umocnienia materiału,
m – współczynnik czułości na prędkość materiału,
 ε - odkształcenie,
 $\dot{\varepsilon}$ - prędkość odkształcania,
 σ - naprężenie uplastyczniające.

Ostateczny warunek podobieństwa plastycznego sprowadza się do tego, aby wartości współczynników n i m były takie same dla materiału rzeczywistego i modelowego. Dobranie współczynnika n nie stwarza większych trudności, w przeciwieństwie do doboru współczynnika m . Na ogół materiały stosowane do fizycznego modelowania są bardziej czułe na prędkość odkształcania niż materiały rzeczywiste.

Aby usprawnić dobór materiałów do fizycznego modelowania tworzone są bazy danych zawierające informacje dotyczące składów różnych materiałów modelowych oraz ich krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie opisanych współczynnikami C , m i n [8, 28]. Autor również zbudował taką bazę danych dla najczęściej stosowanych miękkich materiałów modelowych, takich jak: plastelina oraz syntetyczny wosk filia, modyfikowanych dodatkami kaolinu, lanoliny, wazeliny, parafiny oraz kredy. Otrzymane wyniki badań zaprezentowano szczegółowo w rozdziale 7.2.

Warunek podobieństwa geometrycznego

Warunek podobieństwa geometrycznego sprowadza się do tego, aby stosunki rzutów odpowiadających sobie boków obiektu rzeczywistego i modelu na osie współrzędnych były jednakowe

$$\frac{x_r}{x_m} = \frac{y_r}{y_m} = \frac{z_r}{z_m} = c \quad (2.4.1.4)$$

Stosunek ten jest nazywany skalą i jest niezbędnym parametrem transformacji wyników uzyskanych z modelu na proces rzeczywisty.

Przy uwzględnieniu skali, siły kształtowania w procesie rzeczywistym F_r opisuje zależność:

$$F_r = F_m \cdot c^2 \quad (2.4.1.5)$$

Natomiast zależność między prędkościami narzędzi modelu V_m i obiektu rzeczywistego V_r opisuje równanie:

$$V_r = V_m \cdot c \quad (2.4.1.6)$$

gdzie: F_m , V_m – siły i prędkości wyznaczone w modelu fizycznym,
 F_r , V_r – siły i prędkości w procesie rzeczywistym.

Warunek podobieństwa termicznego

W procesach kształtowania plastycznego temperatura odkształcanego materiału ulega zmianie. Z jednej strony następuje jej wzrost w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło, z drugiej strony natomiast jej obniżenie w wyniku oddawania ciepła do otoczenia. O bilansie cieplnym całego procesu decyduje, więc głównie ciepło właściwe i współczynnik przewodzenia stosowanych materiałów w danym procesie. Parametry te są

inne dla materiałów modelowych i dla materiałów rzeczywistych, dlatego spełnienie warunku podobieństwa termicznego w sposób bezpośredni jest praktycznie niemożliwe. W celu spełnienia tego kryterium stosowane są dwie metody pośrednie. Pierwsza, to całkowite pominięcie wpływu temperatury, gdy wiemy, że nie doprowadzi to do zbyt dużych błędów. Druga metoda polega na dobraniu materiałów modelowych tak, aby spełnić warunki podobieństwa plastycznego dla materiału rzeczywistego w trakcie odkształcania, gdy nastąpi już wzrost jego temperatury w warstwach wewnętrznych, w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło oraz spadek temperatury w warstwach stykających się z chłodnymi narzędziami.

Najlepszym rozwiązaniem jest skonstruowanie próbki modelowej złożonej z kilku warstw, o różnym stopniu twardości. Materiał modelowy w poszczególnych warstwach jest tak dobrany, aby próbka miała wyższą wartość granicy plastyczności w warstwach zewnętrznych, które w procesach rzeczywistych są chłodniejsze niż w warstwach wewnętrznych. Takie rozwiązanie może być użyte w typowych procesach spęczania i wyciskania, gdzie chłodzenie jest efektem oddawania ciepła z próbki do narzędzi poprzez powierzchnie zewnętrzne.

Podobieństwo warunków tarcia

Zjawisko tarcia, jakie zachodzi między materiałem a narzędziami w procesach przeróbki plastycznej, ma wpływ na rozkład odkształceń i naprężeń, jak również na pojawienie się stref martwych oraz na kierunek płynięcia materiału. Dlatego bardzo istotne jest spełnienie podobieństwa warunków tarcia w procesie modelowym.

W zależności od przyjętego modelu tarcia w danym eksperymencie możemy otrzymać różne warunki podobieństwa. Przedstawione poniżej warunki podobieństwa uwzględniają jedynie najprostsze, powszechnie stosowane modele tarcia. Dla modelu Coulomba:

$$\tau = \mu \cdot N, \quad (2.4.1.7)$$

gdzie: N – nacisk,
 μ – współczynnik tarcia,

warunek podobieństwa ma postać:

$$\mu_m = \mu_r. \quad (2.4.1.8)$$

Dla modelu tarcia Treski:

$$\tau = m \cdot k, \quad (2.4.1.9)$$

gdzie: k – granica plastyczności na ścinanie,
 m – wskaźnik tarcia,

warunek podobieństwa ma analogiczną postać:

$$m_m = m_r . \quad (2.4.1.10)$$

Popularne są również inne zmodyfikowane formy modeli tarcia, które uwzględniają dodatkowe informacje o własnościach materiałowych pary trącej lub warunkach kontaktu między nimi:

- ✓ model Wanheima – Bay`a,
- ✓ model Chena – Kobayashi`ego,
- ✓ model Nortona – Hoffa.

Poprawne wyznaczenie warunków tarcia stanowi bardzo poważny problem. Często, bowiem wyznaczany współczynnik tarcia w różnych próbach dla tego samego materiału wyraźnie się różni [66]. Ponadto ustalenie, w jakim stopniu i które czynniki mają istotny wpływ na tarcie w czasie eksperymentu, jak również symulacja i niejako przewidywanie warunków tarcia w procesach kształtowania plastycznego jest rzeczą bardzo trudną.

Najprostszą stosowaną techniką symulacji tarcia w modelowaniu fizycznym, która może posłużyć do oceny wpływu tarcia na dany proces, jest przeprowadzenie dwóch eksperymentów: jednego bez tarcia i drugiego z maksymalnym tarcie. Najłatwiejszym sposobem symulowania eksperymentu bez tarcia, tzn. z minimalnym tarcie jest użycie wazeliny jako smaru i wykonanie na powierzchni próbki maleńkich otworów, do których jest ona wprowadzana. Powierzchnia narzędzia powinna być gładka, najlepiej, gdyby była wykonana z akrylu. W eksperymentach z maksymalnym tarcie nie używa się smaru, a powierzchnie narzędzi powinny być chropowate. Praktycznym rozwiązaniem tego problemu jest użycie drobnego papieru ściernego przyklejonego do powierzchni narzędzi.

Metody wyznaczania współczynnika tarcia dla miękkich materiałów modelowych zostały szczegółowo omówione w rozdziale 2.5.

Warunek podobieństwa w zakresie sprężystym

Dla materiału modelowego i rzeczywistego warunek podobieństwa w zakresie sprężystym jest spełniony, gdy odkształcenia odpowiadające granicy plastyczności są równe dla obu materiałów. Może to być zapisane następująco:

$$\left[\frac{\sigma_o}{E_{wp}} \right]_m = \left[\frac{\sigma_o}{E_{wp}} \right]_r , \quad (2.4.1.11)$$

Niekiedy warunek ten opisany jest następującą zależnością:

$$\left[\frac{\tau}{G} \right]_m = \left[\frac{\tau}{G} \right]_r, \quad (2.4.1.12)$$

gdzie: σ_0 – granica plastyczności próbki badanego materiału,
 E_{wp} – moduł sprężystości podłużnej próbki badanego materiału,
 τ – granica wytrzymałości na ścinanie,
 G – moduł sprężystości poprzecznej (Kirchhoffa),
 m, r – indeksy określające odpowiednio materiał modelowy, bądź rzeczywisty.

Jeśli sprężysta deformacja narzędzi jest istotna w rzeczywistym procesie, to musi być spełniony także warunek, że geometryczna zmiana narzędzi modelowych odpowiada geometrycznym zmianom rzeczywistych narzędzi. Można to zapisać następującym równaniem:

$$\left[\frac{\sigma_o}{E_t} \right]_m = \left[\frac{\sigma_o}{E_t} \right]_r, \quad (2.4.1.13)$$

oraz

$$v_m = v_r, \quad (2.4.1.14)$$

gdzie: E_t – moduł sprężystości podłużnej narzędzia,
 ν – współczynnik Poisson'a,
 σ_0 – granica plastyczności badanego materiału narzędzia.

Dla procesów, w których sztywność samej maszyny jest istotna, jak np.: przy dużej liczbie przejść w procesie walcowania, kryterium podobieństwa ma postać:

$$\left[\frac{\delta}{l} \right]_m = \left[\frac{\delta}{l} \right]_r, \quad (2.4.1.15)$$

gdzie: δ – deformacja elementu maszyny w procesie,
 l – długość odkształconego elementu maszyny.

Uwzględniając, że:

$$\delta = \frac{F}{S}, \quad (2.4.1.16)$$

oraz

$$F = A \cdot \sigma_{upl}, \quad (2.4.1.17)$$

gdzie: F – siła,
 S – sztywność,
 A – powierzchnie styku narzędzia z materiałem,
 σ_{upl} – naprężenie uplastyczniające,

otrzymamy:

$$\frac{S_m}{S_r} = \frac{(\sigma_{upl})_m}{(\sigma_{upl})_r} \frac{l_r}{l_m} \frac{A_m}{A_r}. \quad (2.4.1.18)$$

Natomiast, jeśli geometryczny współczynnik skali l_r/l_m zostanie wyrażony przez c otrzymamy:

$$\frac{S_m}{S_r} = \frac{(\sigma_{upl})_m}{(\sigma_{upl})_r} \frac{1}{c^2} c = \frac{1}{c} \frac{(\sigma_{upl})_m}{(\sigma_{upl})_r} \quad (2.4.1.19)$$

Powyższe równanie oznacza, że stosunek sztywności maszyny w modelowaniu fizycznym do sztywności maszyny w procesie rzeczywistym musi być taki sam, jak stosunek naprężeń w obu tych procesach pomnożony przez odwrotność geometrycznego współczynnika skali.

Warunek podobieństwa dynamicznego

W przypadku, gdy proces formowania zachodzi przy dużych prędkościach musi być spełniony warunek podobieństwa dynamicznego, który można zapisać w następującej postaci:

$$\frac{(1/2\rho V^2)_m}{(1/2\rho V^2)_r} = \frac{(\vartheta\sigma_{upl}\varepsilon)_m}{(\vartheta\sigma_{upl}\varepsilon)_r}, \quad (2.4.1.20)$$

gdzie: V – prędkość,
 ϑ – objętość,
 ρ – gęstość.

Jeśli ϑ i ε są jednakowe dla modelu i rzeczywistego procesu, to można ten związek zapisać następująco:

$$\left[\frac{\rho\vartheta^2}{\sigma_{upl}} \right]_m = \left[\frac{\rho\vartheta^2}{\sigma_{upl}} \right]_r, \quad (2.4.1.21)$$

Badania prowadzone przez wielu naukowców, również przez autora pracy wykazały, że spełnienie wszystkich warunków podobieństwa jest praktycznie niemożliwe [143, 147]. Niektórzy naukowcy twierdzą, że nie można uzyskać materiału modelowego, którego krzywa płynięcia plastycznego wykazywałaby idealne podobieństwo do krzywej umocnienia rzeczywistego materiału, gdyż dla materiałów modelowych występują choćby inne warunki termiczne, związane z generowaniem ciepła, wymianą ciepła, czy też konwekcją podczas odkształcania [6, 24, 115].

Ponieważ bardzo trudno spełnić wszystkie warunki równocześnie, bardzo często wybiera się tylko te warunki podobieństwa, które są najistotniejsze dla danego procesu [8, 148]. Na przykład podobieństwo w zakresie sprężystym można pominąć w procesach, gdzie występują duże odkształcenia plastyczne. Warunek ten jest natomiast istotny, kiedy sprężyste właściwości badanego materiału wpływają na proces np.: duże odkształcenia sprężyste narzędzi – odkształcenia sprężyste walców w miejscu przyłożenia największych nacisków jednostkowych.

Z kolei spełnienie warunku dotyczącego podobieństwa dynamicznego ma znaczenie tylko dla modelowania procesów, w których mamy do czynienia z dużymi siłami bezwładności, wywierającymi wpływ na plastyczną deformację badanego materiału (np.: kształtowanie wybuchowe).

W dostępnej literaturze znaleźć można również inne warunki podobieństwa [76] lub kryteria dotyczące prawidłowego przeprowadzenia eksperymentów na materiałach miękkich [24, 32, 125], czy też pewne reguły przybliżonego modelowania (bez matematycznych opisów) [33, 34, 69, 71, 94, 151]. Jednakże budzą one dużo wątpliwości i są na ogół spełnione dla ściśle określonego procesu.

Poprawne modelowanie rzeczywistego procesu kształtowania plastycznego, wymaga przeprowadzenia pełnej analizy i syntezy tego procesu oraz odpowiedniej ewolucji eksperymentu na materiale modelowym.

Podczas analizy należy zdefiniować najważniejsze problemy rzeczywistego procesu oraz sprecyzować cel eksperymentu. Informacje te będą determinowały najważniejsze parametry modelowania fizycznego. Problemy zdefiniowane podczas analizy mogą dotyczyć różnych części systemu wytwarzania obejmującego materiał, narzędzia, maszyny. Można tu zastosować klasyfikację systemu wytwarzania proponowaną przez Lange'go [79]. System wytwarzania, zgodnie z tą klasyfikacją, jest złożony z 8 obszarów:

1. Obszar materiału odkształcanego.
2. Właściwości materiału przed odkształceniem.
3. Właściwości materiału po odkształceniu.
4. Problemy tribologiczne występujące podczas odkształcania.
5. Narzędzia.
6. Reakcja między powierzchnią odkształcanego materiału a otoczeniem.
7. Maszyny.
8. Dodatkowe zewnętrzne urządzenia np. automatyzujące proces.

Podczas analizy procesu wytwarzania dla każdego z wymienionych obszarów występują różne zagadnienia. Najważniejsze z nich, na które można znaleźć odpowiedź poprzez modelowanie fizyczne przedstawiono w tablicy 2.4.1 [147, 148].

Tablica 2.4.1. Problemy powstałe podczas analizy procesu, które są rozwiązywane poprzez modelowanie fizyczne

Obszar w systemie wytwarzania	Celem analizy jest określenie następujących parametrów
1. Obszar materiału odkształcanego	- sposób płynięcia materiału, - rozkład odkształceń, prędkości odkształcania i naprężeń.
2. Materiał przed odkształceniem	kształt.
3. Materiał po odkształceniu	- kształt, - geometryczne właściwości powierzchni, - odkształcenia powrotne.
4. Powierzchnie graniczne	- naprężenia normalne i styczne do powierzchni, - tarcie, - zużycie, - deformacja powierzchni.
5. Narzędzia	- rozkład odkształceń i naprężeń, - odkształcenia sprężyste.
6. Powierzchnie zewnętrzne	geometryczne i mechaniczne właściwości powierzchni.
7. Maszyny	- wartość i kierunek sił kształtowania, - zależność pomiędzy obciążeniem, przemieszczeniem i czasem, - deformacja maszyn.
8. Zewnętrzne urządzenia	układ narzędzi.

Po zdefiniowaniu problemów w analizowanym procesie należy przeprowadzić syntezę tego procesu, która obejmuje następujące zagadnienia [148]:

Zdefiniowanie, jaka część procesu ma być modelowana. Bardzo często, aby odpowiedzieć na jedno z zagadnień przedstawionych w tablicy 2.4.1 nie ma potrzeby modelowania całego procesu, wystarczy bowiem zamodelować tylko jego małą część. Modelując jakiś fragment procesu rzeczywistego można znacznie uprościć przebieg eksperymentu. Należy jednak być przy tym bardzo ostrożnym, aby zastosowane uproszczenia nie powodowały błędów.

Idealizacja wybranego procesu. Poprzez zastosowanie uproszczeń w analizowanym procesie można modelowanie przeprowadzić znacznie łatwiej i szybciej. Uproszczenia te można podzielić na trzy grupy:

I. Idealizacja dotycząca geometrii i sił kształtowania

W miarę możliwości złożone stany odkształcenia i naprężenia należy zastępować płaskimi i osiowosymetrycznymi stanami odkształcenia lub płaskimi stanami naprężenia, które są znacznie łatwiejsze do analizy. Wskazane jest przyjmowanie jednorodnych odkształceń oraz konstruowanie narzędzi o uproszczonych kształtach. Można zakładać, że obszary strefy martwej oddzielone są od pozostałego odkształcanego materiału linią prostą.

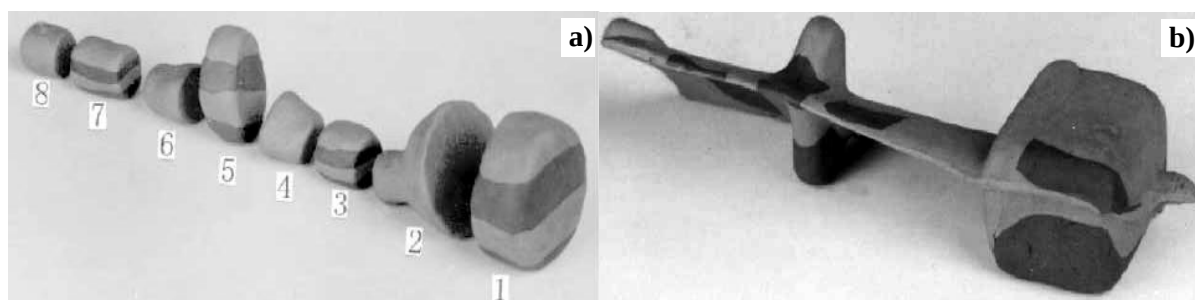
II. Idealizacja parametrów odkształcania

Podczas modelowania fizycznego, w celu jego ułatwienia można przyjąć, że: wzrost temperatury podczas odkształcania nie ma wpływu na naprężenie uplastyczniające, siły bezwładności mogą być pominięte oraz stosowane narzędzia są sztywne.

III. Idealizacja dotycząca warunków plastyczności odkształcanego materiału oraz tarcia

Dotyczy założenia jednorodności materiału oraz przyjęcia prawa płynięcia plastycznego oraz modelu tarcia.

W modelowaniu fizycznym bardzo chętnie stosowany jest podział złożonej struktury na proste fragmenty, które można łatwo modelować oddzielenie (rys. 2.4.1) [52, 82, 148, 155].



Rys. 2.4.1. Łopatką wirnika podzieloną na proste fragmenty wykonane z plasteliny: a) przed odkształcaniem oraz b) po procesie kucia.

Z kolei najbardziej kosztowne i czasochłonne jest modelowanie niesymetrycznych, trójwymiarowych procesów, dla których trzeba stosować przestrzenne koordynacyjne siatki. Samo przygotowanie takiej warstwowej próbki oraz dokonywanie warstwowych wielokrotnych serii pomiarów nastręcza wiele trudności. Prowadzone są obecnie prace nad możliwością zastąpienia takiego modelu przez łatwiejszy do analizy model o prostszych schematach odkształceń i na tej podstawie wnioskowaniu o złożonej strukturze.

Na przykład podejmowane są próby wyznaczenia sił kształtowania na podstawie podobnej pracy odkształcenia plastycznego, które wykazały zadowalającą zgodność dla procesów geometrycznie podobnych [116]. Podstawowym problemem zastosowania uproszczonych modeli do analizy złożonych stanów jest wybór schematu odkształcania, sposób transformacji wyników oraz wiarygodność takiej transformacji [148].

Stosując uproszczenia podczas modelowania fizycznego trzeba wiedzieć, jaki wpływ mogą one mieć na ostateczny wynik symulacji. Przeprowadzenie zbyt radykalnej idealizacji może doprowadzić do dużych błędów. Ponadto w wielu procesach nie ma możliwości zastosowania uproszczeń.

Wybór metody pomiarowej

Poprawne przeprowadzenie eksperymentu wymaga wyboru odpowiednich metod pomiarowych dla transformacji poszczególnych danych pomiarowych z eksperymentów na procesy rzeczywiste. W zależności od tego, co należy wyznaczyć w danym eksperymencie modelowania fizycznego, dobiera się odpowiednią metodę pomiarową. Przy czym, nieco inne metody stosuje się w przypadku materiałów rzeczywistych, a inne dla materiałów modelowych.

Najprostszą i najczęściej stosowaną metodą pomiarową jest obserwacja [148]. Metodą tą można określić deformację materiału, sposób wypełnienia matrycy, wyznaczyć obszary, w których występuje ścinanie materiału, a nawet maksymalne naprężenia rozciągające poprzez zastosowanie materiału czułego na naprężenia rozciągające (w materiale takim tworzą się pęknięcia prostopadle do kierunku działania naprężeń rozciągających). W obserwacji powszechnie stosowana jest również metoda wizjoplastyczności [6, 16, 17, 69, 153].

W przypadku, gdy w modelowaniu należy określić parametry ilościowe, takie jak rozkłady odkształceń oraz naprężeń, konieczny jest pomiar przemieszczeń. W przypadku prostych modeli np.: w płaskim stanie odkształcenia można je wyznaczyć na podstawie deformacji siatki pomiarowej naniesionej na zewnętrzną powierzchnię odkształcanej próbki. Natomiast dla struktur złożonych 3D należy zastosować wielokolorowe warstwowe próbki [64, 128, 133, 134, 148]. Wówczas przemieszczenia określa się w poszczególnych warstwach, które są zdejmowane z próbki przy pomocy specjalnych noży. Fotograficzna rejestracja siatek koordynacyjnych odkształcanych w kolejnych fazach deformacji plastycznej, czy też zastosowanie kamery lub narzędzi wykonanych z materiałów przezroczystych, umożliwiają pełną analizę kinematyki płynięcia kształtowanego materiału, a także analizę stanu odkształcenia i naprężenia w funkcji czasu.

W eksperymentach, w których wyznaczone są parametry siłowe, takie jak hydrostatyczne naciski w odkształcanym materiale, wartości i kierunki sił oraz zależności siły kształtowania od przemieszczenia należy dodatkowo zastosować specjalnie czujniki pomiarowe [65, 105, 148].

Na uwagę zasługują również fotooptyczne metody pomiarowe: np.: techniki Moire, czy metoda plasto- i elastooptyczna, wykorzystujące m.in. zjawisko „dwójłomności wymuszonej”. Całe spektrum obecnie stosowanych metod pomiarowych dla różnych materiałów modelowych podaje L. Kowalczyk w rozdziale 5 swojej monografii [76].

Wybór materiału modelowego

Podstawowym problemem w modelowaniu fizycznym jest dobór odpowiedniego materiału modelowego. Najprościej można przeprowadzić modelowanie procesu obróbki plastycznej metali lub stopów metali, wtedy, kiedy materiał modelu ma ten sam, co materiały obiektu skład chemiczny, makro- i mikrostrukturę, charakteryzują go identyczne przemiany fazowe, a właściwości mechaniczne są takie same lub bardzo zbliżone. W tym przypadku, jak wykazuje praktyka modelowania można, stosunkowo prosto uzyskać mechaniczne oraz fizyko-chemiczne podobieństwo odkształcanych ciał. Natomiast wówczas, kiedy materiały obiektu i modelu znacznie się od siebie różnią składem chemicznym i budową strukturalną, tak jak jest to w przypadku miękkich materiałów modelowych, przyjmuje się, że podstawowym warunkiem doboru materiałów do modelowania jest rodzaj procesu i związane z nim rozkłady naprężeń i odkształceń pochodzące od wewnętrznych lub zewnętrznych obciążeń [76, 148].

Wybór materiału modelowego jest również silnie uzależniony od symulowanego zjawiska, w mniejszym stopniu od metody pomiarowej. Na przykład, w celu symulacji pęknięcia jako materiał modelowy stosuje się wosk parafinowy, który bardzo dobrze ujawnia powierzchniowe mikro- i makropęknięcia [10, 12, 17, 54, 154]. Z kolei, gdy w eksperymencie wymagane są znaczne odkształcenia plastyczne, należy zastosować ciągliwy materiał modelowy [96], np.: plastelinę. Zastosowanie określonej metody pomiarowej wykorzystującej np.: linie poślizgu w próbie ściskania walcowej próbki lub też użycie materiałów plasto-optycznych, które umożliwiają „zamrażanie” stanu odkształcenia ogranicza nieco wybór materiału modelowego.

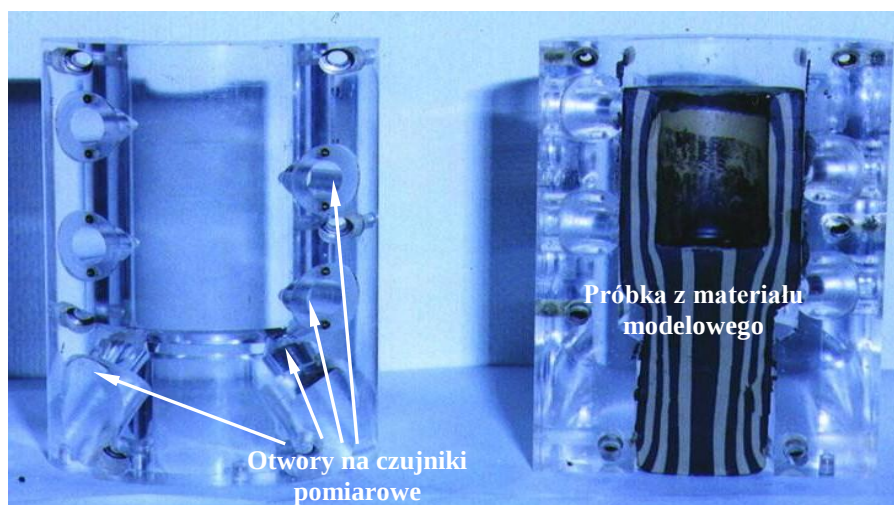
Modelowanie fizyczne bardzo często wymaga opracowania nowego materiału modelowego poprzez zastosowanie innych dodatków. Wymagania dotyczące materiału modelowego zależą również od tego, czy w eksperymencie wyznaczone będą wyłącznie przemieszczenia, czy też parametry siłowe. W pierwszym przypadku zgodność

współczynnika umocnienia oraz prędkości odkształcania dla materiału modelowego i rzeczywistego nie jest tak istotna, jak w przypadku drugim. Krzywe umocnienia dla materiału rzeczywistego i modelowego powinny być wcześniej wyznaczone w osiowosymetrycznej próbie spęczania lub w płaskim stanie odkształcenia. W obu przypadkach wpływ tarcia powinien być zminimalizowany. Należy również zwrócić uwagę na pęknięcia powstające na powierzchni próbki w trakcie próby spęczania, gdyż, mimo, że będą one ledwo zauważalne, mogą wywierać istotny wpływ na wyniki.

Wybór materiału na narzędzia do modelowania fizycznego

Narzędzia do modelowania fizycznego mogą być wykonane z tych samych materiałów, co narzędzia wykonane w procesach rzeczywistych. Przypadek ten ma miejsce wtedy, gdy zastosowano do modelowania narzędzia używane w procesach przemysłowych. Częściej jednak narzędzia są wykonane z innych materiałów, niż narzędzia rzeczywiste, wówczas najczęściej wykorzystuje się materiały łatwoobrabialne takie jak: aluminium, drewno, tworzywa sztuczne.

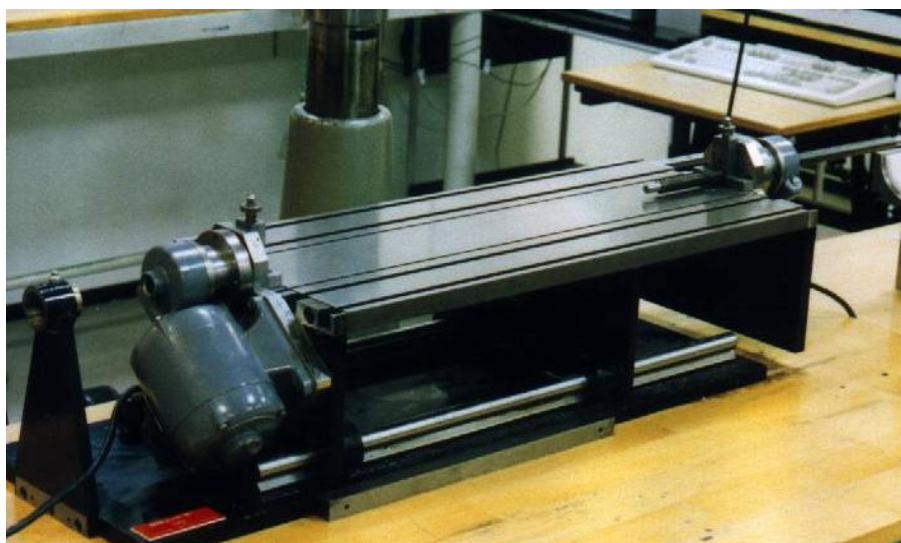
Narzędzia mogą być wykonane z materiałów nieprzezroczystych, wówczas jednak analizę procesu można przeprowadzić dopiero poprzez pomiary wykonane na modelu po zakończeniu modelowania. Natomiast w przypadku zastosowania narzędzi wykonanych z przezroczystego tworzywa sztucznego, można rejestrować deformację materiału w trakcie procesu. Dodatkowo można również stosować specjalne czujniki wbudowane w narzędzia, które pozwalają wyznaczać naciski na powierzchni narzędzi, pochodzące od odkształcanego materiału (rys. 2.4.2).



Rys. 2.4.2. Narzędzia kształtujące do złożonego wyciskania wykonane z akrylu z otworami na czujniki pomiarowe oraz odkształcona próbka

Wybór urządzenia do modelowania

Typ procesu (statyczny/dynamiczny) oraz stan naprężenia i odkształcenia w modelowanym procesie przeróbki plastycznej decyduje o użyciu określonego urządzenia. Najprostszy jest dobór urządzeń do realizacji procesów kucia i wyciskania w płaskim lub osiowosymetrycznym stanie odkształcenia, gdyż wówczas można modelować część wyrobu stosując dodatkowo w płaszczyźnie symetrii przezroczystą płytę (szybę), przez którą można rejestrować deformacje materiału. Takie procesy można przeprowadzać na małych uniwersalnych prasach o napędzie elektrycznym (rys. 2.4.3).



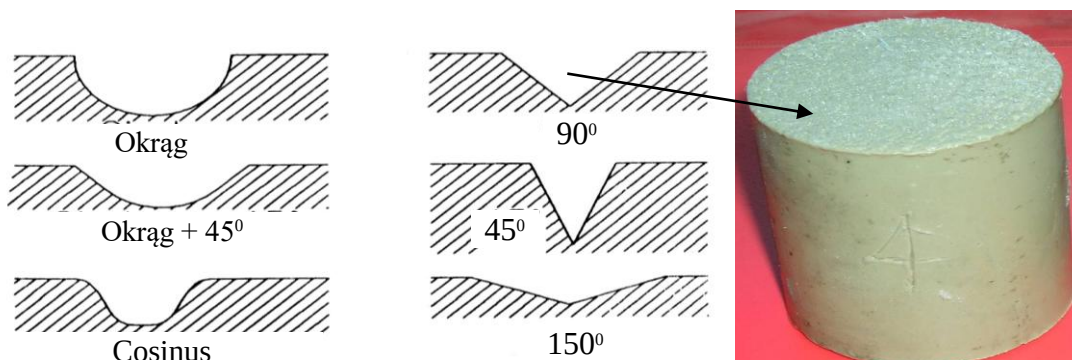
Rys. 2.4.3 Prasa modelowa do płaskiego i osiowosymetrycznego procesu kształtowania plastycznego wosków

W procesach, w których występują bardziej złożone stany odkształcenia i naprężenia, takich jak walcowanie, stosuje się bardziej skomplikowane urządzenia np.: walcarki z walcami wykonanymi z przezroczystego akrylu.

Wybór warunków tarcia

Tarcie bardzo istotnie wpływa na deformację materiału oraz siłę procesu, dlatego warunki tarcia w procesie modelowym muszą być bardzo zbliżone do warunków rzeczywistych. W przypadku miękkich materiałów modelowych takich jak woski i plasteliny często dochodzi do zacierania, bądź przywierania materiału modelowego do powierzchni narzędzia [92], co należy wziąć pod uwagę przy doborze smaru. W procesie modelowym warunki tarcia można zmieniać poprzez zmianę środka smarującego lub poprzez wykonanie odpowiednich otworków na powierzchni próbki, w których umieszczany jest zapas środka smarującego. W pracy [12] przedstawiono wpływ kształtu otworków wykonanych na powierzchni próbki na warunki tarcia (rys. 2.4.4).

Tarcie jest ponadto sporym utrudnieniem podczas przeprowadzania eksperymentów z zastosowaniem przezroczystych płyt, przez które rejestruje się deformację materiału w trakcie procesu. Tarcie pomiędzy płytą a materiałem modelowym powinno być bliskie zeru, co jest w praktyce trudne do spełnienia.



Rys. 2.4.4. Różne kształty rowków na środzku smarującym oraz próbki z „kieszeniami smarnymi” stosowane w modelowaniu fizycznym

Zjawisko tarcia oraz metody określenia wielkości tarcia zostały szczegółowo opisane w rozdziale 2.5.

Wybór skali modelowania

Wybór skali modelowania zależy od celu modelowania – czy modelowane jest dane zjawisko, czy cały proces lub fragment procesu – jak również od tego jak bardzo model ma być zbliżony do rzeczywistości oraz od mocy maszyny kształtującej i dostępnych środków.

Stosowanie skali powiększonej i pomniejszonej ma swoje wady i zalety. W przypadku stosowania skali powiększonej, niekiedy trudno zbudować narzędzia modelowe większe od rzeczywistych, dodatkowo ich zużycie jest dość znaczne, zaś materiał, z którego są wykonane, zbyt kosztowny, a jego obróbka pracochłonna. Do zalet skali powiększonej należy zaliczyć możliwość lepszej obserwacji i wnikliwszej analizy badanych zjawisk. Z kolei do zalet skali pomniejszonej należą: oszczędność materiału modelowego oraz możliwość użycia urządzeń o małej mocy do odkształcania modelu. Natomiast wadą jest mniejsza dokładność pomiaru charakterystycznych wielkości.

Realizację eksperymentu modelowego w tej samej skali, co proces rzeczywisty stosuje się wtedy, kiedy istotne jest jak najlepsze zbliżenie procesu modelowego do rzeczywistości. Skalę modelowania należy ustalić po wnikliwej analizie wszystkich możliwych kryteriów podobieństwa.

2.4.2. Materiały modelowe

Z poprzednich rozdziałów wynika, że ogromnie ważną rolę przy modelowaniu procesów przeróbki plastycznej odgrywa materiał modelowy, bowiem w zasadzie większość warunków podobieństwa, dotyczy bezpośrednio właściwości samego materiału modelowego. Podstawowym warunkiem prawidłowego modelowania jest więc dobór takiego materiału, aby najlepiej symulował, podczas odkształcania zachowanie się rzeczywistego materiału [59, 61, 76, 126, 129, 148].

Wymagania stawiane materiałom modelowym

Wymagania stawiane materiałom modelowym są głównie związane z warunkami podobieństwa wynikającymi z modelowania fizycznego procesów obróbki plastycznej: podobieństwa materiału w zakresie plastycznym, podobieństwa warunków tarcia, termicznych i dynamicznych oraz podobieństwa materiału w zakresie sprężystym. Ponadto materiałom modelowym stawiane są dodatkowe wymagania:

- materiał powinien umożliwiać uzyskanie znacznych odkształceń plastycznych bez naruszenia spójności tegoż materiału,
- materiał modelowy powinien zachowywać podobieństwo, takich właściwości jak: homogeniczność, izotropia, nieściśliwość do materiału rzeczywistego,
- powinien posiadać odpowiednie własności technologiczne takie jak: obrabialność, łatwość klejenia i odlewania do dowolnej formy,
- materiał modelowy powinien charakteryzować się – jeżeli to możliwe – odpowiednią siatką krystalograficzną podobną do materiału rzeczywistego,
- nie powinien być podatny na tworzenie naprężeń wewnętrznych podczas przygotowania modelu (klejenie, odlewanie, obróbka mechaniczna),
- powinien charakteryzować się dużą odpornością właściwości mechanicznych na wahania czynników otoczenia takich jak: temperatura, wilgotność,
- materiał modelowy powinien być stosunkowo tani i prosty w użytkowaniu.

Przegląd materiałów modelowych

W literaturze spotkać można różną klasyfikację materiałów modelowych stosowanych przy modelowaniu procesów obróbki plastycznej. Najogólniej materiały te można podzielić na dwie grupy: **metaliczne i niemetaliczne** [76, 129]. Do metalicznych materiałów można zaliczyć: aluminium, ołów, sód, miedź oraz „przezroczyste związki metali” (AgCl, AgBr, TiCl, CsCl, CsBr, itp.). Natomiast do niemetalicznych: tworzywa sztuczne, gumę, wazelinę różne rodzaje czystych wosków i plastelin oraz ich mieszaniny z różnymi dodatkami.

Metaliczne materiały modelowe ze względu na duże podobieństwo fizykochemiczne do materiałów rzeczywistych są wykorzystywane przy określeniu właściwości strukturalnych oraz parametrów siłowych. Jednakże wadą ich stosowania jest użycie maszyn wielkogabarytowych o dużych siłach kształtujących oraz narzędzi wykonanych z trudnoobrabialnych materiałów o dużych właściwościach wytrzymałościowych.

Niemetaliczne materiały modelowe są szczególnie wykorzystywane do badania sposobu wypełnienia matrycy, lokalizacji powstawania stref martwych oraz błędów płynięcia materiału, a także do określenia parametrów siłowych procesu. Największą wadą materiałów niemetalicznych jest ich duża wrażliwość na prędkość odkształcania oraz temperaturę.

Wśród **niemetalicznych materiałów modelowych** bardzo chętnie stosowane są materiały woskowe. Dotychczasowe badania prowadzone w wielu ośrodkach naukowych nad niemetalicznymi materiałami modelowymi doprowadziły do wyodrębnienia dwóch grup:

I. Materiały modelowe bazujące na naturalnych lub syntetycznych woskach z różnego rodzaju dodatkami [6, 16, 46, 47, 94, 80, 131]:

a) na bazie miękkich wosków (syntetyczny wosk filii, mieszaniny filii z mikrowoskiem, żywicą i kaolinem oraz mieszaniny mikrowosku z żywicą i kaolinem). Materiały te nadają się do odkształcania przy temperaturach pokojowych [8, 46, 59],

b) na bazie twardych wosków (mieszaniny bazujące na parafinie i czeremchu z dodatkami wosku pszczelego i karnauby, a także czysty wosk parafinowy). Materiały te przy temperaturach pokojowych są bardzo kruche i mogą być odkształcane przy temperaturach podwyższonych ($35\div 43\text{ }^{\circ}\text{C}$) [16, 44, 80, 127, 131].

II. Materiały modelowe oparte na różnego rodzaju czystych plastelinach lub ich mieszaninach zawierających zarówno dodatki zmiękczające, jak i utwardzające [14, 21, 26, 59, 112, 126, 143].

Ogólna charakterystyka niemetalicznych, miękkich materiałów modelowych na bazie syntetycznego wosku filii oraz plasteliny

W skład niemetalicznych miękkich materiałów modelowych stosowanych w modelowaniu fizycznym wchodzi różnego rodzaju mieszaniny glin i wosków. Do najczęściej stosowanych wosków należą woski parafinowe oraz mikrokrystaliczne; obie grupy wosków mogą być pochodzenia naturalnego lub być otrzymane w wyniku syntezy chemicznej. Uzyskiwane są one na drodze destylacji ropy naftowej i składają się z łańcuchów węglowodorowych rozgałęzionych, liniowych lub niekiedy mają budowę cykliczną. Woski

parafinowe są zazwyczaj kruche a wzrost ich plastyczności rośnie wraz ze wzrostem temperatury topnienia. Woski mikrokrystaliczne zawierają mniejsze kryształy i więcej cyklicznych węglowodorów aniżeli woski parafinowe. Zawartość substancji oleistych dla wosków mikrokrystalicznych waha się w granicach od 2 do 12 %, podczas gdy dla wosków parafinowych nie przekracza 0,5 %. Oba rodzaje wosków można rozróżnić po rozpuszczeniu i wydzieleniu z roztworu substancji oleistych i suchych [12, 75].

Stosowne powszechnie do modelowania plasteliny i woski na bazie filii charakteryzują się przede wszystkim małym modułem Younga, dużą ściśliwością, dużą czułością na prędkość odkształcania, dużą czułością na temperaturę oraz zazwyczaj osłabieniem odkształceniowym. Taka charakterystyka poza właściwościami sprężystymi jest odpowiednia do modelowania odkształcania metali na gorąco. Podobieństwo w warunkach odkształcania na zimno jest znacznie trudniejsze do uzyskania. Wprawdzie można już uzyskać woski z umocnieniem odkształceniowym (materiały na bazie filii i kaolinu lub kredy w ściśle określonych warunkach prędkościowo-temperaturowych) jednak nadal są one bardzo czułe na prędkość odkształcania, co ogranicza warunki podobieństwa.

Ponadto materiały modelowe na bazie wosków oraz plastelin wykazują zjawisko tiksotropii, to znaczy ich zachowanie zależy od rodzaju i ilości barwnika, stopnia wymieszania, warunków wytwarzania oraz warunków i czasu przechowywania (niektóre źródła podają nawet czas, po którym zostały wykonane badania od momentu wykonania próbek).

WOSK FILIA

Skład chemiczny, otrzymywanie oraz struktura wosku filia jest chroniona prawami patentowymi należącymi do producenta, duńskiej firmy „Filia” w Ølsted. Z tego też powodu nie można jednoznacznie i dokładnie stwierdzić, z jakiego typu związkami lub mieszaniną związków, zwłaszcza od strony chemicznej mamy do czynienia. Bardzo szczegółowo badaniem filii zajmowała się grupa naukowców Duńskiego Uniwersytetu Technicznego w Lønhøj, która też opracowała jedną z technologii przygotowania próbek do badań modelowych z tego materiału [148]. Znane są również prace polskich naukowców, uczestniczących w tych badaniach, m.in.: Adamczyk, Cacko, Świątkowski, Gronostajski, Niechajowicz, dotyczących czystego wosku filia [2, 8, 9, 28].

W celu dokładniejszego poznania składu i budowy filii przeprowadzono w Danii analizę chemiczną, w wyniku, której poprzez rozpuszczenie oraz gotowanie filii w HCCl_3 uzyskano biały proszek oraz substancję woskową. Analiza ta pozwoliła stwierdzić, że filia składa się z 68,3 % proszku i 31,7 % wosku. Badania MRJ (magnetycznym rezonansem jądrowym) otrzymanego proszku wykazały, że jest to mieszanina 55÷60 % kaolinu oraz

40÷45 % kredy. Wosk wyodrębniony z filii poddano analizie w podczerwieni. Uzyskane wyniki porównano z rezultatami podobnych badań wosku mikrokrystalicznego (indramic). Wyniki obu analiz były podobne. Należy, więc przypuszczać, że filia składa się głównie z kredy, kaolinu oraz mikrokrystalicznego wosku [39]. Natomiast wśród dostępnej literatury dotyczącej składu chemicznego i struktury, zarówno z dziedziny chemii organicznej, jak i publikacji z obszaru modelowania fizycznego przy użyciu materiałów woskowych, znajdują się jedynie lapidarne i niepotwierdzone informacje, z których wynika, że filia jest mieszaniną złożonych, naturalnych lub syntetycznych substancji organicznych oraz związków nieorganicznych. Najczęściej są to mieszaniny estrów wyższych kwasów monokarboksylowych i wyższych alkoholi jednowodorotlenowych, o własnościach fizycznych zbliżonych do wosku pszczelego. Wosk pszczeli jest polimerem, a dokładniej oligomerem, który swoje specyficzne właściwości zawdzięcza występowaniu w nim estrów kwasu palmitynowego i stearynowego z alkoholami o różnych długościach łańcuchów węglowych, jak np.: alkohol micrylowy $C_{30}H_{61}OH$ [28, 75, 113, 149, 150].

Materiały modelowe na bazie filii charakteryzują się mniejszym stopniem niejednorodności struktury w porównaniu do plasteliny, a zatem ich właściwości są bardziej stabilne, bowiem zjawisko tiksotropii może być znacznie zmniejszone na drodze topienia i ponownego odlewania. Dlatego są one wykorzystywane również w badaniach parametrów siłowych analizowanych procesów.

PLASTELINA

Plastelina jest to bezbarwna lub zabarwiona pigmentami amorficzna masa plastyczna, nietwardniejąca, podatna do wielokrotnego formowania. Od strony chemicznej jej skład bywa różny i najczęściej – czysta plastelina – jest mieszaniną estrów wyższych kwasów monokarboksylowych oraz wyższych alkoholi jednowodorotlenowych o parzystej liczbie atomów węgla (16-36). W zasadzie nie ma ściśle określonych ograniczeń dotyczących składu i struktury chemicznej plasteliny. Zwraca się uwagę przede wszystkim na jej walory użytkowe. Niekiedy w skład „zanieczyszczonej” plasteliny wchodzi jeszcze: mieszanina gliny lub kaolinu z woskiem, olejem, siarką, z tlenkiem cynku, mieszanina wosku pszczelego z pakiem i dodatkiem pigmentów nieorganicznych oraz mieszanina takich substancji, jak kreda, wosk, talk, domieszki węglowodorów szeregu parafinowego. Gliny wchodzące w skład plastelin to skały ilaste, np.: kaolinit o wzorze $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$. Według Lee i Blazynskiego [80] plastelina jest mieszaniną obojętnych mineralnych olejów i wypełniaczy tworzących amorficzny materiał, który jest podatny na zmiany właściwości mechanicznych oraz tiksotropię z powodu różnic: w sposobie przygotowania i czasie przechowywania, rodzaju użytych domieszek lub barwnika. Istnieją również specjalne gatunki plasteliny o podwyższonych walorach jakościowych i użytkowych, w szczególności do modelowania.

Przedsiębiorstwo Chemii Gospodarczej PRODRYN w Chorzowie opatentowało taki gatunek plasteliny [21]. Jest ona mieszaniną od 8 do 25 części wagowych syntetycznego wosku, od 2 do 10 części wagowych syntetycznego kauczuku, od 40 do 65 części wagowych kredy strąconej, od 2 do 10 części talku, od 0,1 do 2 części wagowych pigmentu i od 5 do 20 części wagowych oleju mineralnego. Również bardzo dobre właściwości mechaniczne (duża wytrzymałość na ściskanie i plastyczność) i modelowe wykazuje plastelina wyprodukowana przez Harbutt`s Plasticine Co. Ltd oraz plastelina o nazwie własnej Beck, jak i jej mieszaniny z olejami parafinowymi, wyprodukowanymi w Gomaringen (Niemcy)[112].

Plastelina jest dość chętnie stosowana do modelowania statycznych i dynamicznych procesów obróbki plastycznej metali i ich stopów. W badaniach prowadzonych na plastometrze krzywkowym wykazano, że podobieństwo krzywych rozciągania i ściskania dla plasteliny oraz stali wskazuje na możliwość określenia oporu odkształcenia stali o zawartości 0,55 %C odkształcanej na gorąco na podstawie badań przy użyciu plasteliny. Wówczas uzyskane wyniki dla próbek modelowych z plasteliny należy powiększyć około 100 razy, gdy próbki modelowe odkształcane są statycznie i 200-300 razy w przypadku odkształcania dynamicznego [72].

Umacnianie i osłabianie się materiałów modelowych podczas ich odkształcenia

Z braku wystarczających informacji trudno jest precyzyjnie opisać strukturę i właściwości miękkich materiałów modelowych na bazie syntetycznego wosku filii oraz plasteliny. Tym bardziej poznać dokładniej zagadnienia związane z umacnianiem i osłabianiem się materiałów modelowych. Możliwy jest jednak zgrubny, mniej dokładny opis, mający ogromną wartość dla zrozumienia mechanizmów odkształcania się i właściwości mechanicznych miękkich materiałów modelowych, które zaliczyć należy do materiałów polimerycznych. Aby tego dokonać należy przedstawić krótki przegląd istotnych cech strukturalnych polimerów, a następnie poznać zjawiska i zachowanie się tych materiałów pod wpływem obciążeń. Należy podkreślić, że dostępna wiedza dotycząca tego zagadnienia ogranicza się jedynie do analizy pojedynczych związków polimerycznych. Rzadko można spotkać konkretne opracowania dotyczące tej problematyki dla znacznie bardziej złożonych substancji, np.: modyfikowanych dodatkami (umacniającymi bądź osłabiającymi) poprzez wprowadzanie różnych domieszek, takich jak np.: kaolin, kreda, lanolina, parafina, czy też wazelina, jak ma to miejsce dla filii i plasteliny. W pozycji [30] podano, że zjawisko umacniania plasteliny podczas odkształcania jest prawdopodobnie rezultatem emisji lotnych, niestabilnych elementów w wypełniaczu mineralnym albo mieszaniami się i przenikaniem do wewnątrz próbki środka smarnego. Na uwagę zasługuje także praca [28], w której badano wpływ modyfikatorów takich jak kreda, kaolin oraz cukier na umacnianie się filii, podczas jej

odkształcania. Nie udało się jednakże uzyskać jednoznacznej odpowiedzi, czy w przypadku dodawania kredy i kaolinu do tych materiałów w celu zwiększenia umocnienia istotne są takie czynniki jak: kształt i twardość oraz ilość wprowadzanych cząstek. Zaproponowano jedynie, że dalsze badania dotyczące tego problemu powinny iść w kierunku bardzo twardych i drobnych cząstek napełniacza. Wprowadzając tego typu dodatki do materiałów modelowych, należy w przypadku odkształcania mieć na uwadze nie tylko odkształcanie się samych łańcuchów polimerów, lecz traktować odkształcanie się tych materiałów, jak odkształcalność związków kompozytowych.

W przypadku filii i plasteliny wspomniane powyżej dodatki, zwane napełniaczami, ze względu na znacznie większe rozmiary cząstek od odległości między łańcuchami polimerów, oddziałują głównie fizycznie rzadko wchodząc w reakcje chemiczne z samymi polimerami.

Powszechnie wiadomo, że każdy wytwórca jest w stanie zidentyfikować swój polimer, lecz rzadko zdradzi, jakich użył dodatków. Dlatego zasadniczą sprawą jest identyfikacja źródła, z którego pochodzi dane tworzywo, choć jak to ma miejsce w przypadku filii, czy też plasteliny jest to praktycznie niemożliwe. Oczywiście niezbędne w takim przypadku są badania pomocne w określeniu podstawowych informacji dotyczących polimerów, takich jak np.: struktura, skład chemiczny, stopień krystalizacji i usieciowania, czy też temperatura zeszklenia i topnienia lub orientacja łańcuchów makrocząsteczek wskutek przyłożonego obciążenia. Jednakże przeprowadzenie tego typu badań w przypadku bardzo złożonych związków jest żmudne, kosztowne, a przede wszystkim niezwykle trudne w poprawnej interpretacji i polega w zasadzie na wykluczaniu oddziaływania poszczególnych czynników, dlatego niekiedy może okazać się bezcelowe.

MATERIAŁY POLIMEROWE

Materiałami polimerowymi są wieloskładnikowe związki chemiczne złożone z polimeru lub mieszanin polimerów oraz z co najmniej jednego dodatku takiego jak: stabilizator, napełniacz, kompatybilizator, antyutleniacz, pigment, antystatyk, antypiren, nośnik. Polimery zbudowane są z monomerów składających się głównie z atomów węgla połączonych w łańcuchy główne za pomocą chemicznych wiązań pierwotnych kowalencyjnych lub jonowych, charakteryzujących się regularnym, bądź nieregularnym kształtem i długością oraz chętnie reagujących z identycznymi lub innymi cząsteczkami. Jest to możliwe dzięki obecności w nich, co najmniej dwóch ośrodków reaktywnych, takich jak wiązanie nienasycone, grupy chemiczne i pierścienie reaktywne. Liczba ośrodków reaktywnych określa funkcjonalność monomeru i ma bezpośredni wpływ na budowę

makrocząsteczki. Makrocząsteczki są niekiedy połączone między sobą za pomocą fizycznych, znacznie słabszych wiązań międzycząsteczkowych, takich jak: siły Van der Waalsa oraz wiązania wodorowe lub poprzez kowalencyjne sieciujące wiązania poprzeczne. Temperatura, przy której ulegają rozpadowi słabe wiązania międzycząsteczkowe, jest niska; niewiele wyższa od temperatury pokojowej. Dlatego wiele z tych materiałów można łatwo kształtować w zakresie niskich temperatur bliskich temperaturze pokojowej.

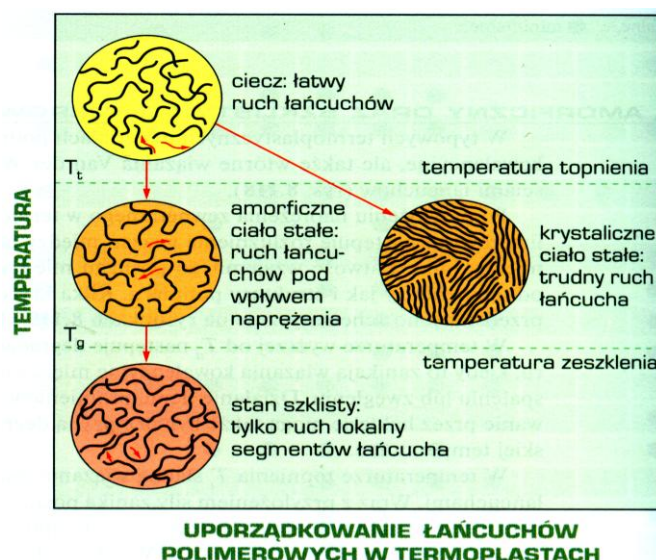
W zależności od kształtu i budowy makrocząsteczek oraz wiązań między nimi, polimery można podzielić na: liniowe, rozgałęzione i usieciowane. Makrocząsteczki liniowe powstają z cząstek dwufunkcyjnych, a ich długość jest 100-1000 razy większa od ich średnicy. Ponieważ ich łańcuchy nie są usieciowane, dlatego też łatwo mięknią (stają się plastyczne) podczas ogrzewania – rozpadają się wiązania drugorzędowe i polimer zachowuje się jak lepka ciecz, co umożliwia jego formowanie. Makrocząsteczki rozgałęzione powstają z cząstek dwufunkcyjnych oraz nieznacznej liczby monomerów trójfunkcyjnych lub przypadkowych zanieczyszczeń, ewentualnie na skutek ubocznych reakcji w łańcuchu głównym. Efektem jest pewna liczba krótszych lub dłuższych łańcuchów odchodzących od łańcucha głównego. Makrocząsteczki usieciowane, o złożonym kształcie, powstają z monomerów dwu i więcej funkcyjnych, w wyniku wytworzenia poprzecznych wiązań między łańcuchami. Budowa łańcuchów makrocząstek w istotny sposób wpływa na właściwości polimerów [75, 150].

Polimery ze względu na strukturę można podzielić na całkowicie bezpostaciowe (amorficzne) oraz częściowo bezpostaciowe, a częściowo krystaliczne (semikrystaliczne) i krystaliczne – w rzeczywistości nie ma polimerów całkowicie krystalicznych, co jest związane z różnym rozkładem ciężarów cząsteczkowych. Polimery krystalizują dość trudno i zwykle obok uporządkowanych obszarów krystalicznych zwanych krystalitami zawierają obszary bezpostaciowe. Zdolność polimeru do krystalizacji zależy od chemicznej i geometrycznej budowy makrocząsteczki oraz od wielkości sił międzycząsteczkowych. Im prostsza i bardziej regularna jest budowa cząsteczek i im większe są siły międzycząsteczkowe, tym polimer łatwiej krystalizuje. Krystalizację utrudniają duże podstawniki, rozgałęzienia, takie jak: ataktyczność i sieciowanie makrocząsteczek [13]. Także *izomerizm polimerów*, polegający na różnych możliwościach usytuowania podstawników (rodników) w strukturze łańcuchów cząsteczek o takim samym składzie chemicznym wpływa na właściwości, sposób łączenia się poszczególnych łańcuchów, ich przemieszczania, a w konsekwencji i odkształcania się polimerów. Cząsteczki materiałów polimerowych, w zależności od czynników wewnętrznych i zewnętrznych, takich jak budowa cząsteczki, temperatura oraz czas niezbędny do zmiany stanu uporządkowania, mogą wykonywać ruchy

powodujące ich powstawanie, czyli **konformację łańcuchów** [37]. Częściowe ruchy poszczególnych segmentów lub zmiany położenia całych łańcuchów nazywane są odpowiednio **mikro i makroruchami Browna**.

Zachowanie polimerów podczas odkształcania i zmian temperatury

Polimery mogą występować w różnych stanach mechanicznych, poczynając od stanu sprężystego (sprężysto-kruchego lub lepkosprężystego) przy niskich temperaturach lub przy wysokich częstotliwościach, poprzez wysokoelastyczny, a kończąc na lepkopłynnym w wysokich temperaturach i niskich częstotliwościach. Właściwości mechaniczne polimerów zależą od ich ciężaru cząsteczkowego, temperatury, prędkości odkształcania oraz czasu działania obciążenia. Zwiększenie szybkości odkształcania wiąże się ze wzrostem granicy plastyczności, z kolei wzrost temperatury wpływa na jej obniżenie [13, 37, 149]. Stan fizyczny polimerów zależy od typu struktury polimeru oraz temperatury. W polimerach nie występują jednoznacznie określone granice fazowego rozdziału strukturalnego. W czasie przejścia polimerów w stan stały powstają swobodne objętości decydujące bezpośrednio o zależności własności polimerów od czasu (częstotliwości) działającego obciążenia oraz temperatury. *Objętością swobodną* jest dodatkowa objętość zajmowana przez zwarcie upakowane, pozbawione możliwości zmian położenia makrocząsteczki. To właśnie dzięki objętości swobodnej, wspomaganej dodatkowo przez energię cieplną, makrocząsteczki mogą przemieszczać się względem siebie, umożliwiając tym samym lepkie płynięcie polimeru. Przejście polimeru z jednego stanu do drugiego zachodzi przy określonej temperaturze, której wartość jest charakterystyczna dla danego rodzaju polimeru (rys. 2.4.2.1). Temperatura, przy której objętość swobodna staje się zbyt mała, aby możliwa była zmiana położeń i przegrupowywanie segmentów makrocząsteczek na skutek obniżania temperatury, określa się mianem temperatury *zeszklenia* T_g . Temperatura zeszklenia jest tak ważna dla polimerów, jak temperatura krystalizacji dla metali. Temperatura *płynięcia* T_f jest temperaturą przejścia ze stanu wysokoplastycznego w stan plastyczny, ciekły. Określana jest niekiedy jako temperatura *topnienia* T_t , czyli temperatura zmiany stanu skupienia ze stanu stałego w stan ciekły. Poniżej T_g , wiązania drugorzędowe wiążą makrocząsteczki w ciało stałe (stan szklisty); powyżej T_g wiązania drugorzędowe rozrywając się umożliwiają występowanie mikro- i makroruchów Browna, powodujących odkształcenie materiału. W temperaturze topnienia T_t słabną wiązania między skręconymi i splątanymi łańcuchami. Wówczas wraz z przyłożeniem siły zanika poślizg między łańcuchami a polimer płynie bez udziału odkształceń sprężystych oraz wykazuje stan zdalny do odlewania.



Rys. 2.4.2.1. Wpływ temperatury na strukturę i zachowanie termoplastycznych materiałów polimerowych [37]
(wg D.R. Akselanda)

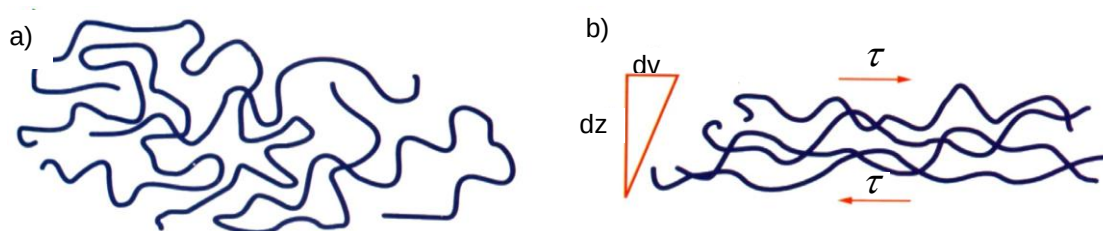
Nieznacznie poniżej T_t , polimer osiąga stan termoplastyczny, gdy po przyłożeniu naprężenia następuje odkształcenie zarówno plastyczne, jak i sprężyste. Po zdjęciu obciążenia odkształcenie sprężyste szybko zanika, natomiast odkształcenie plastyczne stale postępuje jako efekt makroruchów Browna. Poniżej temperatury topnienia T_t , łańcuchy polimerowe są splątane, a polimery mają najczęściej amorficzną strukturę kłębkową lub semikrystaliczną o małym stopniu krystalizacji. Po przyłożeniu naprężenia zewnętrznego następuje rozluźnienie wiązań między łańcuchami i względny poślizg między nimi. Łatwość wzajemnego poślizgu zależy zarówno od temperatury, jak i struktury polimeru. Przy temperaturze niższej od temperatury mięknięcia, wiązania między łańcuchami stają się mocniejsze, a polimer jest bardziej sztywny i wytrzymały oraz wykazuje stan termosprężysty. Poniżej temperatury zeszklenia T_g polimery są twarde, kruche i szkliste [37].

Wraz z ochłodzeniem, poniżej temperatury topnienia liczne polimery ulegają częściowej krystalizacji, tworząc tzw. *strukturę lamelarną*. Jest to efekt regularnego układania się giętkich łańcuchów polimeru równolegle do siebie i prostopadle do ściany kryształu. W przypadku polimerów bardzo często określa się stopień krystalizacji, który mówi o poszczególnych udziałach faz w polimerze. Polimery o strukturze amorficznej lub semikrystalicznej charakteryzują się niską energią aktywacji, wobec czego ich odkształcenie następuje przy niskim naprężeniu. Natomiast polimery o dużym stopniu krystaliczności (także ciekłokrystaliczne, charakteryzują się wysoką energią aktywacji. Polimery przy niskim naprężeniu (zwłaszcza w wyższych temperaturach) szybko zwiększają swe odkształcenie w miarę powolnego poślizgu, najpierw poszczególnych segmentów, a następnie całych łańcuchów polimerowych względem siebie, co jest związane z ruchami Browna. Zjawisko to

jest nazywane *pełzaniem polimerów*, przebiegającym dla niektórych polimerów nawet w temperaturze pokojowej. Natomiast *lepkość związków polimerycznych* wyjaśnia, w jaki sposób łańcuchy poszczególnych makrocząsteczek poruszają się i umożliwiają odkształcenie polimerów (rys. 2.4.2.2). Lepkość dla liniowych, nieusieciowanych łańcuchów pojedynczego polimeru można opisać za pomocą:

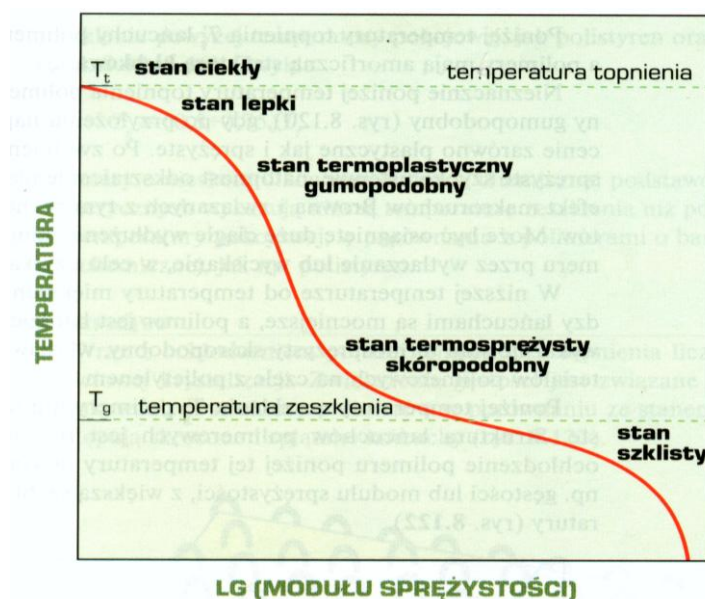
$$\eta = \frac{\tau}{dv/dz}, \quad (2.4.2.1)$$

gdzie: τ - naprężenie ścinające powodujące wzajemny poślizg sąsiadujących łańcuchów,
 dv/dz - gradient szybkość odkształcenia, odpowiadający szybkości wzajemnego relatywnego przemieszczania się łańcuchów makrocząsteczek podczas odkształcania.



Rys. 2.4.2.2. Schemat układu łańcuchów polimerowych a) przed b) podczas odkształcenia lepko-sprężystego

Na rys 2.4.2.3 przedstawiono wpływ temperatury na moduł sprężystości amorficznych polimerów termoplastycznych oraz na kolejne stany fazowe polimeru. Optymalną temperaturą plastycznego kształtowania materiału jest temperatura wyższa od temperatury zeszklenia. Równie istotnym zagadnieniem w polimerach jest relaksacja naprężeń zachodząca po obciążeniu ze stałym naprężeniem, co jest konsekwencją lepko-sprężystego zachowania się polimerów [37, 113, 149].



Rys. 2.4.2.3. Wpływ temperatury na moduł sprężystości amorficznych polimerów termoplastycznych [37]
 (wg D.R. Akselanda)

Metody i cel modyfikowania polimerów

Właściwości fizyczne w szczególności mechaniczne i termiczne polimerów można modyfikować dwiema metodami: chemiczną i fizyczną. Natomiast w przypadku materiałów modelowych – woski, plastelina – modyfikowanie ma głównie charakter fizyczny. Polega on na mieszanii w stanie plastycznym (stopionym) polimeru z:

- ✓ innym polimerem/polimerami lub kopolimerami, w wyniku czego otrzymuje się mieszaniny lub stopy polimerów,
- ✓ substancjami proszkowymi (włóknistymi), cieczami organicznymi lub nieorganicznymi, w wyniku czego otrzymuje się tworzywo napełniane, warstwowe, laminat lub kompozyt,
- ✓ innymi dodatkami i środkami pomocniczymi – organicznymi bądź nieorganicznymi substancjami ciekłymi, stabilizatorami promieniowania nadfioletowego, antyutleniaczami, barwnikami, pigmentem, w wyniku czego otrzymuje się tworzywo o różnych właściwościach, niekoniecznie wykazujące wzmocnienie.

Celem wprowadzania różnych modyfikatorów jest polepszenie ściśle określonych właściwości. Przeważnie jednak powoduje to poprawę jednych właściwości kosztem pogorszenia innych, dlatego najczęściej wybiera się rozwiązanie kompromisowe. Właściwości kompozytów najogólniej zależą od:

- rodzaju polimeru, budowy fizycznej i chemicznej osnowy (matrycy),
- rodzaju modyfikatora i stopnia rozproszenia fazy,
- adhezji między składnikami układu kompozytowego.

Mieszaniny i stopy polimerowe

Tworzywa polimerowe w przeważającej większości są wzajemnie niemieszalne lub częściowo mieszalne. Oznacza to, że po zmieszaniu dwóch lub większej liczby polimerów nie uzyskuje się mieszaniny homogenicznej, lecz mieszaninę heterogeniczną, w której jeden polimer tworzy tzw. agregaty w drugim. W układach niemieszalnych-heterogenicznych występuje makroseparacja faz z małą adhezją między polimerami w mieszaninie, a wymiar fazy rozproszonej jest większy niż 100 nm. Struktura takich mieszanin jest niestabilna. Natomiast układy mieszalne-homogeniczne, istnieją wówczas, gdy polimery są mieszalne na poziomie molekularnym, a wymiar fazy zdyspergowanego polimeru jest mniejszy niż 0,5 nm. Mieszaniny te są termodynamicznie stabilne [158]. *Termodynamiczną współmieszalność* związków polimerycznych określa się jako zdolność do tworzenia stabilnych układów jednofazowych w całym zakresie ilościowego udziału składników (opisywana prawem swobodnej energii mieszania

Gibbsa). Zastosowanie tzw. *kompatybilizatorów* pozwala zwiększyć adhezję na granicy faz, poprzez utworzenie fazy przejściowej lub specjalnych wiązań chemicznych stabilizujących strukturę, co znacznie poprawia współmieszalność polimerów.

Mieszaniny polimerowe (polymer blends) są układem dwóch lub większej liczby polimerów lub/i kopolimerów, w której udział danego składnika wynosi, co najmniej 2 % wag. *Mieszanina współmieszalna (miscible blend)* jest to taki układ polimerów, w którym wymiary domen są porównywalne do wymiarów statystycznego segmentu makrocząsteczki.

Stop polimerowy (polymer alloy) jest to mieszanina polimerów wzajemnie niemieszalnych, w której struktura i faza pośrednia są zmodyfikowane za pomocą kompatybilizatora. Właściwości mechaniczne są lepsze niż polimerów wchodzących w skład stopu (efekt synergiczny) [158].

Powstające struktury nie zależą jedynie od właściwości poszczególnych polimerów, lecz także od warunków mieszania, które zachodzą w stanie upłynnionym (stopionym). Polimery upłynnione mają postać amorficzną (najczęściej skłębionych łańcuchów) niezależnie od struktury fizycznej, w jakiej występowały w stanie zeszlonym (polimer amorficzny, czy semikrystaliczny).

Właściwości fizyczne kompozycji polimerowych otrzymywanych metodą mieszania zależą od wielu czynników, m.in. od właściwości składników i ich udziału w mieszaniu oraz od struktury fizycznej powstałej mieszaniny, przy czym określenie zależności między strukturą a właściwościami fizycznymi jest dość trudne.

Napełniacze – modyfikatory

Napełniacze wprowadzone do polimerów (mieszanin lub stopów) powodują zmianę prawie wszystkich właściwości fizycznych, np: gęstości, twardości, wytrzymałości na rozciąganie, odporności termicznej i chemicznej, ściernej, itp.

Ogólnie napełniacze można podzielić na:

- ciągle – włókniste,
- proszkowe, o różnej postaci proszku,
- inne substancje.

Najbardziej popularnymi są napełniacze włókniste oraz proszkowe, do rzadkości należą inne substancje ciekłe. Napełniaczami proszkowymi są stałe związki chemiczne w postaci cząstek o różnych kształtach (np.: granulki kredy i kaolinu), których optymalny wymiar ziarna wynosi 0,5-10 mikrometrów. O właściwościach napełniacza decyduje nie tylko jego struktura chemiczna, lecz również właściwości powierzchni, np.: właściwości adhezyjne, czyli zdolność do tworzenia wiązań adhezyjnych (wiązań Van der Waalsa) na granicy napełniacz – polimer oraz wielkość swobodnej energii powierzchniowej.

Ogólne wymagania, jakie powinien spełniać dobry napełniacz są następujące:

- chemiczna obojętność w stosunku do polimeru,
- średnica ziaren 5-10 mikrometrów,
- mała chłonność i zawartość wody,
- dobra zwilżalność przez upłynniony polimer,
- mały ciężar właściwy,
- niepalność i dobra odporność termiczna.

Modyfikacja powierzchni napełniacza

W celu zwiększenia adhezji między napełniaczem a matrycą polimeru stosuje się często związki sianowe i tytanoorganiczne, których działanie polega na sprzęganiu i tworzeniu mostków między powierzchnią napełniacza a polimerem (coupling agents). Związki te tworzą monomolekularną warstwę powierzchni napełniacza. Efektem działania środka sprzęgającego (dodawanego w ilości 0,3-3 % wag.) jest zmniejszenie lepkości stopionej mieszaniny polimer – napełniacz [158].

Z zamieszczonych powyżej informacji wynika, że odkształcanie polimerów jest bardzo złożonym procesem, w trakcie, którego zachodzi wiele, niekiedy wzajemnie wpływających na siebie zjawisk. Zatem poprawna analiza zagadnienia odkształcania materiałów modelowych wymaga uwzględnienia tych wszystkich zjawisk wraz z czynnikami na nie wpływającymi.

2.4.3. Badania właściwości materiałów modelowych

Przedstawione w rozdziale 2.4.2 wymagania dotyczące materiału modelowego jako „specjalnego tworzywa”, wskazują na potrzebę kompleksowego i dokładnego poznania właściwości i struktury materiałów modelowych. Znajomość cech fizyko-chemicznych materiałów modelowych, użytych w symulacjach procesów rzeczywistych, ma duży wpływ na poprawność i dokładność modelowania fizycznego.

Od początku stosowania metod fizycznego modelowania materiały modelowe poddawano najrozmaitszym badaniom, głównie określającym parametry reologiczne, co ma na celu najlepsze zbliżenie materiału modelowego do rzeczywistego. Wpływ reologicznych właściwości materiałów, czyli właściwości zależnych od czasu w badaniach modelowych jest szczególnie istotny przy modelowaniu zjawisk poza obszarem liniowo-sprężystym [102].

Do badań tych można zaliczyć wyznaczenie: krzywych naprężenie uplastyczniające w różnych próbach plastometrycznych, warunków tribologicznych, homogeniczności, izotropii, nieściśliwości oraz próby pełzania, itp.

Krzywe umocnienia

Na podstawie dostępnej literatury, można stwierdzić, że dotychczasowe badania prowadzone nad własnościami niemetalicznych materiałów modelowych dotyczyły głównie możliwości wyznaczenia zależności naprężenie uplastyczniające – odkształcenie rzeczywiste. Podstawową próbą jest próba spęczania (PN-83/H-04411) walcowej próbki pomiędzy płaskimi płytami. Wśród nielicznych publikacji można znaleźć inne próby wyznaczania zależności naprężenie – odkształcenie. W pracy [80] autorzy przedstawili możliwość realizacji próby skręcania walcowych próbek z zakończeniami o przekroju kwadratowym (w celu lepszego zamocowania w uchwycie plastometru skręcającego). Do rzadkości należą: badanie własności materiałów modelowych w próbach rozciągania próbek o przekroju prostokątnym [14, 94], czy ściskania w płaskim stanie odkształcenia [94]. Oczywiście zdecydowanie lepsze i bardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się w próbach rozciągania (eliminowanie wpływu tarcia) lub próbach skręcania (możliwość uzyskiwania większych wartości odkształcenia), jednak niski poziom naprężenia uplastyczniającego materiałów modelowych na bazie wosków i plastelin narzuca konieczność realizacji eksperymentów, w których ściskanie jest dominującym stanem naprężenia. Zdecydowana większość wyników prób spęczania w pracach publikowanych przed rokiem 1970 uzyskiwana była w postaci wykresów zależności $\sigma_{upl} = C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$. Dopiero w publikacjach od lat 70-tych XX w., oprócz wykresów, pojawiają się również równania konstytutywne opisujące uzyskane zależności.

Warunki tribologiczne

Ponieważ tarcie jest niezwykle ważne dla procesów kształtowania plastycznego materiału został mu poświęcony dodatkowy rozdział 2.5.

Homogeniczność i izotropia

Homogeniczność próbki materiału modelowego może być wyznaczona poprzez pomiary gęstości w różnych częściach odlanych próbek. Inny sposób określenia jednorodności polega na pobraniu próbek materiału z górnej i dolnej części wlewką materiału modelowego, sporządzeniu wykresów krzywych $\sigma_{upl} - \varepsilon$ dla obu próbek, a następnie ich porównanie. Również obserwacja makroskopowa wyjściowych próbek może być bardzo pomocna w określeniu ich jednorodności.

Izotropię materiału modelowego można określić w podobny sposób, tzn. poprzez wycięcie próbek w różnych kierunkach z odlanej płyty materiału modelowego, a następnie wyznaczenie zależności naprężenia w funkcji odkształcenia dla poszczególnych próbek i ich porównanie.

Ścisłość

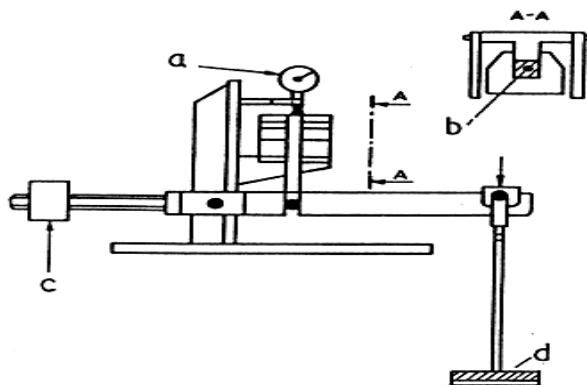
Ścisłość różnych mieszanin woskowych może być zbadana poprzez pomiar zmiany objętości cylindrycznej próbki poddanej ciśnieniu. Technika ta jest również przydatna do sprawdzania obecności porów gazowych w odlanej próbce [148].

Twardość

Pomiaru twardości materiałów modelowych dokonać można za pomocą standardowych twardościomierzy. Podejmowane są również próby określenia podstawowych parametrów równań opisujących krzywą umocnienia dla materiałów woskowych na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów twardości [28].

Pelżanie

Metoda określająca pelżanie materiału modelowego polega na poddawaniu próbki badanego materiału naprężeniu ściskającemu w płaskim stanie odkształcania. Naprężenie ściskające ma stałą wartość podczas całego testu. Próba taka przeprowadzana jest na specjalnym urządzeniu pomiarowym przedstawionym na rys. 2.4.3.1. Metoda ta pozwala również na wyznaczenie wielu innych właściwości reologicznych materiałów, takich jak: relaksację naprężeń oraz nawrót sprężysty.



Rys. 2.4.3.1. Schemat urządzenia do pomiarów pelżania: a) mikrometr, b) badana próbka, c) regulacja położenia, d) ciężarek

Inne właściwości reologiczne

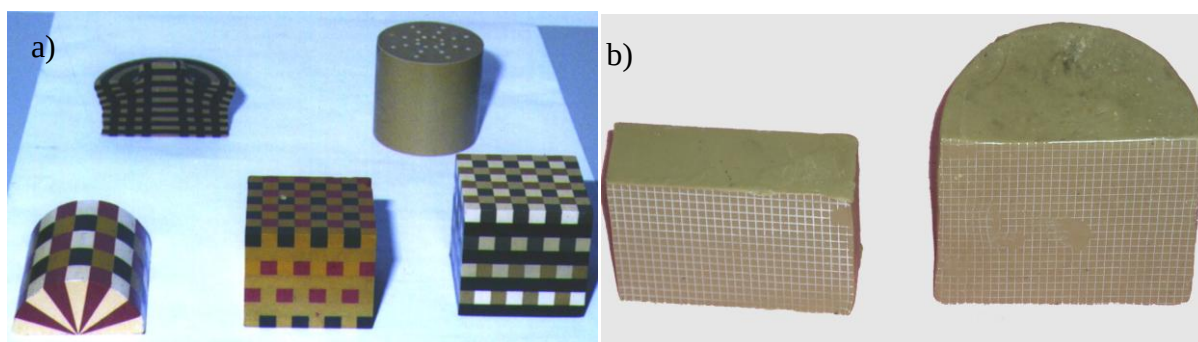
Zastosowanie w badaniach reometrów rotacyjnych lub kapilarnych, pozwala na identyfikację reologiczną zjawisk zachodzących w cieczach nienewtonowskich, a do takich niewątpliwie zaliczyć można miękkie materiały modelowe na bazie filii i plasteliny. Reometry kapilarne pozwalają na bardzo precyzyjne określenie krzywych płynięcia w szerokim przedziale zmienności szybkości ścinania, a także lepkość sprężystości, ale ich wadą jest brak możliwości określenia np.: niestabilnych własności (tikotropii i antytikotropii).

W pracy [40] zastosowano reometr kapilarny (zwykle używany do badań polimerów) do określenia właściwości reologicznych wosku filii, które następnie wykorzystano w badaniach symulacyjnych procesu wyciskania. Na uwagę zasługuje praca [112], w której opisane są badania dotyczące szeregu właściwości reologicznych ($\sigma_0 = \sigma(t)$, $\dot{\varepsilon} = \varepsilon(\sigma)$), lepkości dynamicznej i zjawiska Bouldin'a) plasteliny o nazwie Beck oraz jej mieszanin z olejami parafinowymi, wyprodukowanymi w Gomaringen (Niemcy) podczas jednoosiowego ściskania i w testach relaksacji. Ogromną zaletą tej pracy obok obszernego zestawienia pozycji literaturowych dotyczących plasteliny i jej mieszanin jest wyjaśnienie wielu interesujących zjawisk zachodzących podczas odkształcania.

Metody badań właściwości materiałów modelowych są także pomocne w lepszej interpretacji zjawisk zachodzących podczas odkształcania tych materiałów oraz w celu uniknięcia najczęściej popełnianych błędów w trakcie modelowania fizycznego.

Próbki do badań modelowych

W zależności od celu modelowania fizycznego próbki posiadają zróżnicowaną budowę od prostych brył jednokolorowych, aż po skomplikowane wielokolorowe konstrukcje typu „jam – roll” (rys. 2.4.3.1a). W przypadku miękkich materiałów modelowych bazujących na plastelinie lub wosku próbki uzyskuje się bezpośrednio w procesie krzepnięcia we wlewnicy. Ostateczne wymiary prostych brył otrzymuje się drogą cięcia na zimno materiału modelowego przy użyciu struny fortepianowej na specjalnie skonstruowanych przyrządach. Siatki koordynacyjne nanoszone są na jednokolorowe próbki najczęściej przy pomocy sitodruku (rys. 2.4.3.1b). Próbki do modelowania fizycznego z miękkich materiałów mogą być również wytwarzane na drodze wyciskania [132].



Rys. 2.4.3.1. a) Różnokolorowe próbki wykonane wg techniki jam-roll oraz b) jednokolorowe próbki z siatkami koordynacyjnymi naniesionymi metodą sitodruku

W przypadku materiałów modelowych bazujących na twardych woskach, próbki otrzymuje się w wyniku cięcia odlanych bloków. Wysoka twardość tych materiałów

umożliwia otrzymanie precyzyjnych wymiarów końcowych próbek poprzez obróbkę mechaniczną na różnego rodzaju obrabiarkach.

Sitodrukowanie

Sitodruk jest jedną z metod drukowania, w której stosuje się formę drukarską najczęściej w postaci prostokątnej ramy z napiętą na niej siatką, w której znajdują się wytworzone elementy drukujące i niedrukujące. Podczas drukowania farba drukarska jest nakładana na całą powierzchnię siatki, a następnie za pomocą rakla przeciskana przez elementy drukujące bezpośrednio na podłoże (np.: papier lub próbkę z materiału modelowego) umieszczone nieruchomo pod siatką.

Sitodruk jest wykorzystywany do drukowania jedno- i wielobarwnego na papierze, tekturze, folii, oraz na przedmiotach uformowanych z różnych materiałów, m.in. na butelkach, pojemnikach, płytach czołowych urządzeń i przyrządów kontrolnych. Sitodruk stosowany do drukowania na wyrobach włókienniczych jest nazywany **filmodrukiem**, zaś stosowany w grafice artystycznej i użytkowej – **seriografią**. Sitodruk wykorzystuje się również w mikroelektronice do wytwarzania układów scalonych.

Metody przygotowania materiałów modelowych

Przygotowanie materiałów modelowych jest związane w dużej mierze z ich geometrią oraz składem chemicznym. W literaturze znaleźć można kilka technologii przygotowania miękkich materiałów modelowych na bazie filii [59, 94, 132, 148]. W podobny sposób przygotowywane są materiały modelowe na bazie wosków twardych [14, 131] oraz na bazie plasteliny [14, 56, 59, 132]. W zasadzie są one bardzo podobne do siebie i różnią się jedynie kolejnością, dodaniem lub odjęciem poszczególnych operacji. Niekiedy przygotowanie próbek polega na ich przetłaczaniu z jednego naczynia pod ciśnieniem do drugiego [122].

2.4.4. Zastosowanie modelowania fizycznego

Modelowanie fizyczne jest jednym z najszerzej rozpowszechnionych sposobów modelowania. Jest wykorzystywane w bardzo wielu dziedzinach naukowo – przemysłowych i nie ogranicza się jedynie do symulacji procesów kształtowania plastycznego. Ogólne zastosowanie modelowania fizycznego do analizy rzeczywistych procesów zostało już częściowo przedstawione we wcześniejszych rozdziałach, natomiast dokładniejsze informacje o rodzaju materiałów modelowych stosowanych do określonych procesów oraz o warunkach i parametrach kształtowania podano w tabeli 2.4.4.1.

Tabela 2.4.4.1. Zastosowanie modelowania fizycznego przy użyciu materiałów modelowych w analizie rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego materiału [125]

Nr	Materiał modelowy	Modelowany proces. Metal	Parametry badane	Parametry kontrolowane	Warunki odkształcania	Literatura
1.	Wosk	Kucie wydłużające prętów. Kucie w matrycach zamkniętych. Spękanie. Mięka stal.	Obrazy płynięcia.	Wymiary próbek. Wielkość odkształcenia. Prędkość stempla.		Massey, 1922 [86]
2.	Mieszanina wosków: parafina + karnauba + wosk pszczeli + tlenek cynku	Dziurawienie wlewków stalowych na gorąco.	Obrazy płynięcia. Kształt powstającego otworu. Prędkość zmiany przekroju poprzecznego.	Odkształcanie wkładek woskowych.	T: 46 °C	Holmquist, 1952 [71]
3.	Wosk parafinowy	Wyciskanie metali na gorąco.	Krzywa naprężenie – odkształcenie w próbie ściskania. Obrazy płynięcia. Struktura.	Siła wyciskania. Smarowanie. Prędkość wyciskania 0,04 inch/min	T: 0÷35°C $\dot{\epsilon}$: 0,001÷0,012 min ⁻¹	Barton Bodsworth, Halling, 1958 [16]
4.	Wosk parafinowy	Kucie aluminium na gorąco w matrycach półzamkniętych	Obrazy płynięcia.	Nacisk stempla. Odkształcanie. Wymiary próbek. Współczynnik tarcia. Parametry technologiczne.	T: 25°C	Hertel, 1961 [69]
5.	Mieszaniny wosków	Kucia na gorąco aluminium i metali lekkich w matrycach półzamkniętych	Obrazy płynięcia. Rozkład odkształceń. Rozkład naprężeń.	Odkształcanie. Wymiary próbek. Współczynnik tarcia.	T: 25°C	Heuer, 1962 [64]
6.	Wosk parafinowy	Kucia w matrycach zamkniętych i spękanie stali.	Prędkość stempla. Odkształcanie.	Prędkość stempla. Odkształcanie.	T: 25°C	Brill, 1963 [26]
7.	Wosk parafinowy	Wyciskanie na gorąco i kucie w matrycach zamkniętych metali lekkich.	Obrazy płynięcia	Nacisk stempla. Odkształcanie. Geometria narzędzia. Parametry technologiczne.	T: 10÷30°C	Hertel, 1966 [69]
8.	Mieszaniny wosków: mikrowosk + żywica + kaolin – wosk modelowy FILIA	Odkształcanie wyrobów w postaci brył z aluminium.	Krzywe naprężenie – odkształcenie uzyskiwane z próby ściskania.	Współczynnik tarcia.		Fricker, Wanheim, 1974 [48]
9.	Wosk specjalny	Kształtowanie wydłużające prętów.	Linie poślizgu. Obrazy płynięcia.	Odkształcanie próbek.		Danckert, Wanheim, 1976 [34]
10.	Mieszaniny wosków: żywica naturalna + kaolin + mikrowosk – wosk modelowy FILIA	Kucie skomplikowanych odkuwek	Obrazy płynięcia. Krzywe obciążenie-przemieszczenie dla aluminium i wosku. Rozkład odkształceń w matrycach wykonanych z gumy.	Odkształcanie próbek. Nacisk stempla i jego przemieszczenie.		Danckert, Wanheim, 1977 [34]
11.	Wosk modelowy – FILIA	Kucie stali w matrycach zamkniętych.	Obrazy płynięcia. Rozkład odkształceń. Obliczenia siłowe	Odkształcanie próbek.		Danckert, Wanheim, 1977 [34]
12.	Mieszaniny wosków: żywica sosnowa + kaolin + mikrowosk	Wyciskanie współbieżne prętów. Kucie na gorąco metali	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n \epsilon^m$ w próbach rozciągania i ściskania w płaskim stanie odkształcenia. Obrazy płynięcia. Rozkład odkształceń.	Nacisk stempla i jego przemieszczenie.	T: 18°C	Oudin, Ravalard, Rommens, 1980 [94]
13.	Mieszanina wosków: parafina+cerezyzna +karnauba+wosk pszczeli	Procesy odkształcania plastycznego na zimno i na gorąco.	Krzywe naprężenie-odkształcenie w próbie czystego skręcania.	Moment skręcający i kąt skręcenia.	T: 25÷43°C $\dot{\epsilon}$: 0,5÷5 s ⁻¹	Lee, Blazynski, 1984 [80]
14.	Wosk modelowy – FILIA. Mieszaniny: FILIA + żywica + mikrowosk +kaolin	Odkształcanie metali na gorąco.	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n \epsilon^m (1 + \beta \Delta T)$ w próbach ściskania.	Nacisk stempla i jego przemieszczenie. Temperatura. Prędkość odkształcenia.	T: 15÷22°C $\dot{\epsilon}$: 0,0004÷0,15 s ⁻¹	Finer, Kivivuori, Kleemola, 1985 [47]
15.	Simuwax	Odkształcanie na ciepło i na gorąco stali węglowych, nierdzewnych i jakościowych. Walcowanie obręczy.	Równania konstytutywne z prób ściskania. Obrazy płynięcia. Przemieszczenie materiału.	Siła walcowania. Moment walcowania. Wymiary próbek.	T: 19,8÷22,1°C	Boucly, Oudin, Ravalard, 1988 [25]
16.	Mieszaniny wosków: parafina + cerezyzna + wosk pszczeli + karnauba	Wyciskanie prętów na gorąco.	Czynnik geometryczny. Obrazy płynięcia. Rozkład prędkości odkształcenia i odkształceń.	Geometria narzędzia. Wydłużenie przy wyciskaniu.		Farzad, Blazynski, 1989 [44]
17.	Mieszaniny wosków: parafina + cerezyzna + wosk pszczeli + karnauba	Wyciskanie prętów na gorąco.	Obrazy płynięcia	Geometria narzędzia. Temperatura. Wydłużenie przy wyciskaniu.	T: 35÷40 °C	Świątkowski, 1990 [131]

18.	Wosk FILIA	Kucia na zimno w matrycach zamkniętych	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n$ w próbach ściskania. Obrazy płynięcia. Współczynnik tarcia w próbie spęczania pierścienia.	Współczynnik tarcia. Siła kucia. Przemieszczenie stempla.		Bay, Hansen, Andersen, Oudin, Picart, 1992 [17]
19.	Plastelina	Kucie na zimno kół zębatych	Obrazy płynięcia.	Geometria narzędzia. Siła kucia Temperatura.	T: 22 °C	Meidert M., Knoerr M., Westphal K., Altan T., 1992 [87]
20.	FILIA + kaolin FILIA + mikrowosk FILIA + kaolin + mikrowosk	Odształcanie na zimno stali i metali nieżelaznych	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n$ w próbach ściskania.	Siła – przemieszczenie. Odształcanie.	T: 18,7÷ 20,8 °C $\dot{\epsilon}$: 0,02÷ 0,5 s ⁻¹	Adamczyk, 1992 [2]
21.	FILIA, cerezyna, parafina, wosk pszczeli karnauba oraz ich mieszaniny	Odształcanie stali na zimno i na gorąco.	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n$ w próbach ściskania.	Siła – przemieszczenie. Odształcanie.	T: 22 °C $\dot{\epsilon}$: 0,01 s ⁻¹	Cacko, 1993 Świątkowski, Cacko, Arentoff, Wanheim, 1994 [28]
22.	FILIA + lanolina FILIA + kaolin FILIA + silikon	Odształcanie stali na zimno i na gorąco.	Zależności naprężenie – odkształcenie typu: $\sigma = K\epsilon^n$ w próbach ściskania.	Siła – przemieszczenie. Odształcanie.	T: 18,5÷21,5°C	Arentoff, Gronostajski, Niechajowicz 1995 [8]
23.	FILIA	Łączenie poprzez cięcie	Mechanizmy rozdzielania i łączenia	Siła – przemieszczenie.	T: 22 °C	Dolph P., De Chiffre L. [38]
24.	Plastelina (próbki warstwowe)	Kucie pierścienia przegubu homokinetycznego, Bezwyływkowe kucie korbowa	Obrazy płynięcia. Rozkład odkształceń. Kolejność operacji Optymalizacja kształtu narzędzia	Geometria narzędzia. Siła kucia. Temperatura	T: 22 °C	Vazquez V., Sweeney K., Wallace D., Wolff Ch., Ober M., Altan T., 2000 [144, 145]
25.	FILIA +Kaolin (próbki warstwowe)	Wyciskanie prętów i rur	Obrazy płynięcia. Rozkład odkształceń.	Geometria narzędzia. Siła wyciskania. Temperatura	T: 22 °C	Arentoft M., Gronostajski Z., Niechajowicz A., Wanheim T., 2000 [9]

Niemetaliczne, miękkie materiały modelowe, stosowane w modelowaniu fizycznym, z racji swojej specyficznej budowy znalazły zastosowanie do badań takich procesów, w których ściskanie jest dominującym stanem naprężenia. A zatem przede wszystkim do symulacji procesów kucia, wyciskania, prasowania i spęczania [4, 9, 11, 17, 31, 33, 54-63, 65, 73, 74, 76, 82, 87, 104]. W dostępnej literaturze niezwykle rzadko można spotkać prace omawiające rezultaty badań symulujących procesy, w których występują inne stany naprężenia. Do tych nielicznych wyjątków należy zaliczyć modelowanie fizyczne procesów walcownia tulei rurowych [22], walcowania obręczy [25], walcowania wzdłużnego blach [3], walcowania wzdłużnego kształtowników [117] oraz gięcia grubych blach [73, 74, 154], czy też walcowania skośnego rur [4]. Natomiast nie znaleziono publikacji z zakresu modelowania procesów tłoczenia naczyń lub gięcia cienkich blach oraz procesów ciągnięcia.

Metody fizycznego modelowania z wykorzystaniem miękkich materiałów modelowych znalazły także zastosowanie w analizie powstawania defektów, w szczególności powierzchniowych, wynikających z niewłaściwego sposobu płynięcia materiału w kotlinie odkształcenia [10, 54, 96, 121, 154]. Możliwa jest również symulacja zjawisk pęknięcia przy użyciu odpowiedniego materiału modelowego, ujawniającego mikro- i makropęknięcia [16, 17, 34, 35, 148]. W modelowaniu fizycznym bardzo chętnie stosowany jest podział złożonej struktury na proste fragmenty, które można łatwo modelować oddzielenie [82, 155]. Najbardziej kosztowne i czasochłonne jest modelowanie niesymetrycznych, trójwymiarowych procesów, dla których trzeba stosować przestrzenne siatki koordynacyjne [28, 33].

Istotną zaletą modelowania fizycznego jest możliwość obserwacji zjawisk występujących na powierzchniach styku materiału odkształcanego z narzędziem, zwłaszcza określenie warunków smarowania – szczególnie w procesach kształtowania plastycznego poprzez kucie czy też wyciskanie, w których występuje ogromny przyrost powierzchni wyrobu w porównaniu z powierzchnią materiału wsadowego i bardzo często dochodzi do przerwania warstwy filmu smarnego [18-20]. Współczesne metody modelowania fizycznego umożliwiają również określenie rozkładu, a nawet wartości nacisków jednostkowych występujących na powierzchniach kontaktu materiału z narzędziem oraz określenie długości strefy poślizgu [19].

Wykorzystanie w modelowaniu fizycznym systemów rejestracji obrazów oraz znajomość rozkładów nacisków roboczych i przemieszczeń względnych umożliwia przewidywanie stopnia zużycia narzędzi kształtujących oraz trwałości matryc w procesach kucia na gorąco [133].

Modelowanie fizyczne wyciskania współbieżnego prętów w stanie płaskim oraz rur w stanie osiowosymetrycznym i nieosiowosymetrycznym wykazało, że głównym czynnikiem decydującym o sile wyciskania jest stopień redukcji przekroju [9]. Z przedstawionych badań wynika także, że dla eksperymentalnej oceny siły wyciskania istnieje możliwość zastąpienia złożonego nieosiowosymetrycznego wyciskania przez wyciskanie w płaskim lub osiowosymetrycznym stanie odkształcenia, pod warunkiem zachowania odpowiednich warunków podobieństwa.

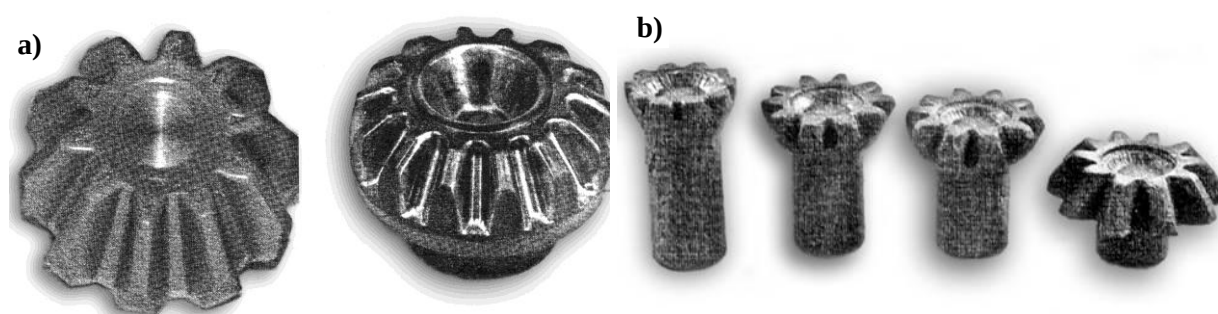
W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój zaawansowanych metod kształtowania plastycznego, w których dąży się do całkowitego wyeliminowania obróbki wykańczającej poprzez wykonanie wyrobu o bardzo zawężonych tolerancjach, tzw. „net shape forming” [63]. W tym obszarze materiały modelowe również znalazły zastosowanie, na przykład do określenia sprężystego odkształcenia narzędzi kształtujących [65]. W takim przypadku w modelowaniu fizycznym wyznacza się rozkłady nacisków na narzędzia pochodzące od odkształcanego materiału modelowego i w oparciu o warunki podobieństwa przelicza się je na naciski w procesie rzeczywistym. Następnie w metodzie elementów skończonych naciski te przykładają się do narzędzi i wyznacza się ich odkształcenia sprężyste [7]. Analiza uzyskanych wyników pozwala ponadto określić poprawność wykonania i zamocowania narzędzi oraz sztywność zastosowanych pras.

Obecnie coraz częściej modelowanie fizyczne jest równolegle stosowane z modelowaniem numerycznym, dostarczając mu niezbędnych informacji dotyczących na przykład warunków brzegowych lub będąc jego weryfikacją. W pracy [89] w celu

zrozumienia jak istotny wpływ na jakość wyrobu ma historia odkształcenia materiału, zastosowano zarówno fizyczne, jak i numeryczne metody modelowania w procesie wyciskania profili. Analiza ta dostarczyła informacji, które pozwoliły poprawić równomierność płynięcia materiału, a zatem i mikrostrukturę gotowego wyrobu oraz zapobiec powstawaniu typowych wad wyciskanych wyrobów, takich jak łuszczenie powierzchniowe. Z kolei w pracy [11] wykorzystano modelowanie fizyczne przy użyciu wosku wraz z analizą numeryczną metodami górnej oceny i elementów skończonych w celu eliminacji wad i określenia optymalnego sposobu odkształcania podczas obrotowego wyciskania elementów rurowych z aluminium.

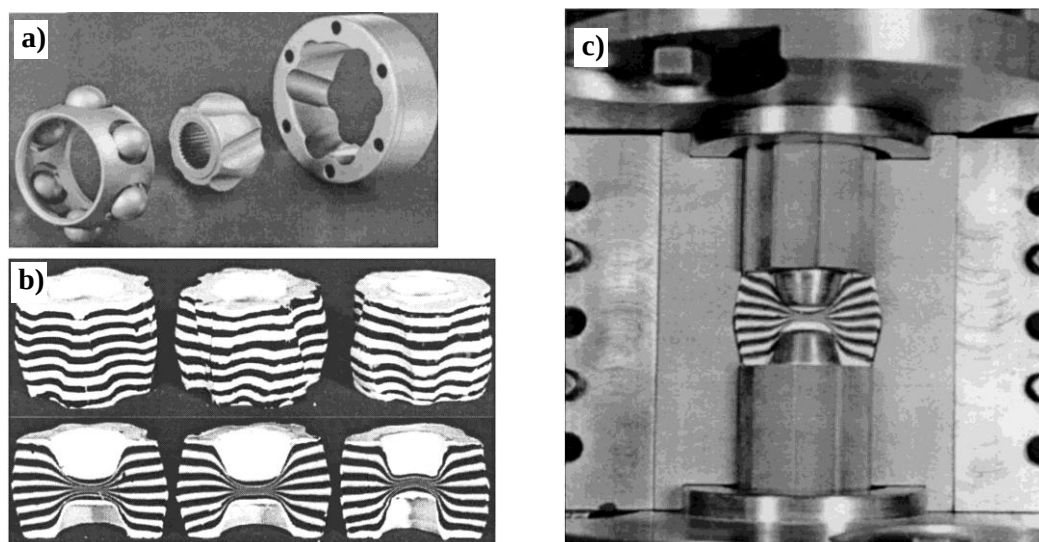
Na uwagę zasługuje również praca [38] dotycząca spawania przez cięcie (z ang. „cut welding”). Przeprowadzona analiza wykazała, że modelowanie fizyczne bardzo dobrze ilustruje mechanizmy zachodzące podczas procesu spawania cięciem, co jest trudne do zamodelowania w symulacjach numerycznych.

Coraz większe zastosowanie znalazły metody numeryczne i fizyczne do analizy wielooperacyjnego formowania wyrobów o złożonych i skomplikowanych kształtach. Zastosowanie metod modelowania fizycznego oraz technik wspomaganych komputerowo (CAE), w pracach badawczo-rozwojowych skupionych wokół ośrodka naukowo-badawczego Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing Ohio State University w USA, wyposażonego w szereg narzędzi do badania procesów kucia i wyciskania oraz numerycznych pakietów obliczeniowych, przyczyniło się do znacznego postępu w modelowaniu procesów kucia i wyciskania części maszyn, w szczególności dla przemysłu samochodowego np. kucie na zimno kół zębatach (rys. 2.4.4.1) [87].

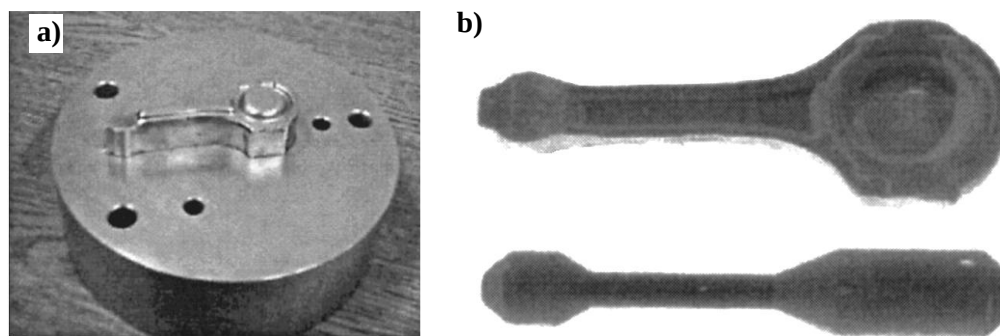


Rys. 2.4.4.1. a) Koło zębate kute na gorąco z rzeczywistego materiału b) model fizyczny wielooperacyjnego kucia na zimno koła zębatego

Do najnowszych osiągnięć tego ośrodka zaliczyć można projekty narzędzi do kucia pierścienia wewnętrznego przegubu homokinetycznego – łożyska o wzdlużnym ruchu obu bieżni m.in.: dla Toyoty (rys. 2.4.4.2) oraz oprzyrządowania do bezwypływkowego kucia korbowodu (rys. 2.4.4.3) [144, 145].



Rys. 2.4.4.2. Homokinetyczny przegub: a) materiał rzeczywisty, b) materiał modelowy, c) narzędzia do modelowania fizycznego



Rys. 2.4.4.3. a) Narzędzie do bezwplywkowego kucia korbowodu z plasteliny wykonanego z aluminium, b) przedkuwka korbowodu wykonana z materiału modelowego

2.4.5. Błędy i ograniczenia

Modelowanie fizyczne procesów obróbki plastycznej pomimo wielu zalet posiada ograniczenia, które mogą prowadzić do uzyskiwania błędnych wyników. Do najważniejszych ograniczeń należy zaliczyć:

Niejednorodność materiału modelowego

Jednym z podstawowych warunków prawidłowego zaprojektowania eksperymentów modelowania fizycznego jest dobór oraz właściwe przygotowanie materiału modelowego. Dobry jakościowo materiał powinien charakteryzować się jednorodną budową, brakiem jakichkolwiek rozwarstwień lub wtrąceń. Wszelkie niejednorodności w rozkładzie wprowadzanych składników lub w strukturze samego materiału mogą prowadzić do błędnych wyników badań. Bardzo ważne jest, więc staranne przygotowanie mieszaniny. Równomierne rozprowadzenie dodatkowych składników w materiale bazowym możliwe jest po jego uprzednim roztopieniu. Podczas topienia i wygrzewania całości mieszaniny może dojść do

segregacji składników wskutek różnic w ich ciężarze właściwym. Konieczne jest zatem, aby tuż przed zalaniem materiału do formy starannie wymieszać stopiony wsad. Proces sedymentacji może również wystąpić w czasie krzepnięcia mieszaniny, zwłaszcza, gdy jest ona rzadkiej konsystencji a drgania stołu wibracyjnego, na którym usytuowana jest stygnąca forma, są zbyt intensywne. Szczególne trudności w uzyskaniu jednorodnej struktury wlewka występują w przypadku znacznych różnic w ciężarach właściwych składników. Wymagane jest wówczas dodatkowe obracanie formy w trakcie procesu krzepnięcia. Różne rozmieszczenie poszczególnych składników w górnym i dolnym obszarze wlewków lub odlanych płyt może prowadzić nawet do kilkudziesięcioprocentowej różnicy w wartości granicy plastyczności w zależności od miejsca pobrania materiału na próbki. Sprawdzenie jednorodności może zostać przeprowadzone na dodatkowo odlanych próbkach poprzez obserwację i porównanie ich przełomu, wyznaczonych krzywych umocnienia, gęstości, ciągliwości, itd.

Anizotropia

Anizotropia materiału modelowego może być wynikiem przyjętej technologii wykonania próbek. Walcowanie lub ich wyciskanie może doprowadzić do zróżnicowania własności reologicznych materiału np. granicy plastyczności, co w konsekwencji może powodować liczne błędy w sposobie odkształcenia próbek. Bardzo podatne na występowanie anizotropii są próbki warstwowe zwłaszcza, gdy poszczególne warstwy wykonywane były w odrębnych procesach kształtowania plastycznego oraz gdy połączenie wyciętych kształtek modelu jest nieodpowiednie lub niewystarczające.

Tiksotropia

Miękkie materiały modelowe, w szczególności plastelina wykazują niekorzystne zjawisko zwane tiksotropią, które spowodowane jest najprawdopodobniej ich amorficzną lub semikrystaliczną (o słabym usieciowaniu) i niejednorodną budową strukturalną. Z tego też powodu ich parametry reologiczne i właściwości mechaniczne silnie zależą od wielu czynników. Wśród nich wyróżnić można: różnice w sposobie przygotowania: czasu topienia i grzania, stopnia wymieszania głównych składników (termodynamiczna współmieszalność) i ich ilości, rodzaj i ilości barwnika, a także warunków i czasu przechowywania. Prawdopodobnie nie istotna jest natomiast szybkość chłodzenia [124]. Wg Arentofta [12] właściwości mechaniczne filii zależą także od czasu mieszania; im operacja mieszania trwa dłużej tym poziom naprężenia uplastyczniającego jest niższy. Należy również zwrócić uwagę na rodzaj i ilość środka smarnego (jego temperatura zapłonu i aktywność chemiczna)

stosowanego jako rozdzielacz podczas zalewania materiału do formy (istotna jest także temperatura formy, jej kształt i wielkość). Z doświadczeń własnych autora wynika, że właściwości reologiczne materiału modelowego zmieniają się nawet wraz z dostarczaną od wytwórcy partią materiału, jak również od czasu użytkowania danej partii. Niekorzystny wpływ tiksotropii można zmniejszyć lub wyeliminować poprzez wielokrotne topienie i ponowne odlewanie materiału [80, 129].

Niestabilność granicy plastyczności

Wyniki badań własności miękkich materiałów modelowych wskazują, że zależą one w istotny sposób od rodzaju, stosunków wagowych oraz stopnia wymieszania użytych składników, procesu wytwarzania materiału, jego parametrów (temperatury i czasu grzania) oraz warunków przechowywania próbek. Materiały na bazie filii lub plasteliny wykazują również dużą wrażliwość na prędkość odkształcenia oraz temperaturę. Wszystkie wymienione czynniki mogą spowodować zmianę charakterystyk materiału modelowego, jak również warunków tarcia w trakcie trwania eksperymentu symulacyjnego, co może prowadzić do błędów. Istotne jest więc spełnienie wymogu zachowania identycznych warunków wytwarzania próbek oraz realizacji badań. Bardzo pomocne okazuje się w tym celu sporządzenie oraz ścisłe przestrzeganie odpowiednich procedur. Podczas przygotowywania próbek do analizy parametrów siłowych badanego procesu zaleca się równoczesne wykonanie kilku dodatkowych próbek, które posłużą do wyznaczenia krzywej umocnienia materiału modelowego. Warunki próby plastometrycznej (temperatura i prędkość odkształcania), powinny być zbliżone do warunków realizacji eksperymentu modelowego. Wyznaczone w ten sposób krzywe umocnienia oraz przebiegi siły w funkcji przemieszczenia stempla, rejestrowane podczas symulacji danego procesu mogą zostać wykorzystane w analizie przeprowadzanego procesu.

Podczas stosowania próbek różnokolorowych należy mieć na uwadze, że ich poszczególne warstwy mogą wykazywać odmienne własności mechaniczne. W przypadku prowadzenia oceny jakościowej badanych procesów różnice te nie powinny przekraczać $\pm 5\%$, natomiast w analizie parametrów siłowych powinny być znacznie mniejsze. Tak wysokie wymagania stawiane próbkom stosowanym w określaniu parametrów siłowych procesu ograniczają możliwość wykorzystywania modeli warstwowych jedynie do obserwacji sposobu odkształcenia i płynięcia materiału, czyli analizy jakościowej. Szczególną uwagę powinno się zwracać również na niebezpieczeństwo wystąpienia zewnętrznych jak i wewnętrznych rys i pęknięć, mogących przyczynić się do spadku wyznaczonej granicy plastyczności.

Niewystarczająca plastyczność

O ile badania symulacyjne nie dotyczą zjawisk pęknięcia [35, 96], stosowane materiały modelowe powinny odznaczać się wystarczającą plastycznością umożliwiającą przeprowadzenie danego procesu kształtowania plastycznego. Wszelkie pęknięcia, nawet mało widoczne, mają znaczny wpływ na sposób płynięcia i pomiar parametrów siłowych.

Tarcie

Tarcie bardzo istotnie wpływa na deformację materiału oraz parametry siłowe procesu, dlatego warunki tarcia w procesie modelowym muszą być bardzo zbliżone do warunków rzeczywistych. Jednym ze sposobów ustalania zgodności warunków tarcia w obu przypadkach jest ich określenie przy pomocy odpowiednich badań symulujących. Wiele z nich bazuje na zmianach geometrycznych próbki zachodzących podczas odkształcania. Tego typu metody są szczególnie odpowiednie dla eksperymentów modelowych, ponieważ pozwalają uniknąć pomiarów parametrów siłowych procesu. Metody wykorzystywane przy określaniu tarcia powinny być geometrycznie związane z symulowanym procesem przeróbki plastycznej oraz zachowywać ich kinematykę.

Jeżeli zastosowane środki smarujące dla eksperymentu modelowego i procesu rzeczywistego dają takie same wyniki w badaniach symulujących, to można założyć, że panujące warunki tarcia są niemal identyczne.

Tarcie między próbką a szklaną płytą

W eksperymentach w płaskim lub osiowo symetrycznym stanie odkształcenia sposób deformacji próbki obserwowany jest często poprzez szklaną szybę. Jej użycie wprowadza dodatkowe tarcie na powierzchni zewnętrznej próbki. Może ono powodować powstawanie pęknięć na powierzchni kontaktu szyby z materiałem modelowym lub błędy w sposobie odkształcania próbki oraz ścieranie siatek koordynacyjnych. Przy wyborze odpowiedniego środka smarującego oraz określaniu warunków współpracy obu powierzchni pomocny okazać się może test cygara, który jest szczególnie zalecany dla małych wartości współczynnika tarcia. Zagadnienie tarcia między szybą a materiałem próbki jest szczególnie istotne, gdy grubość próbki jest znacznie mniejsza od jej pozostałych wymiarów.

Odkształcenia sprężyste

Zakres odkształceń sprężystych większości niemetalicznych materiałów modelowych jest zazwyczaj o rząd wielkości większy aniżeli metali. Według Bodnara [24] stosunek granicy plastyczności do modułu Young'a dla plasteliny wynosi około 0,02, podczas gdy dla stali

odkształcanej na gorąco wynosi on 0,0006-0,003. Bardzo problematyczne może okazać się, więc symulowanie procesów, w których udział odkształceń plastycznych jest niewielki, np.: proces gięcia lub też pomiar twardości [28].

Sprężyste odkształcenia powrotne

Ze względu na znaczny zakres odkształceń sprężystych, materiały modelowe charakteryzują się dużym sprężynowaniem. Zjawisko to może powodować zmianę warunków tarcia i w rezultacie prowadzić do dużych błędów w sposobie płynięcia materiału [146]. Na przykład w przypadku wyciskania współbieżno – przeciwbieżnego naczyń cylindrycznych ścianki modelu wskutek sprężynowania, wykazują tendencję do rozprężania się, co prowadzi do zwiększania nacisków jednostkowych na powierzchni matrycy i stempla. Wzrost wartości tarcia będzie wywoływać osiowe naprężenie ściskające w obu naczyniach, powodując zmianę ich geometrii, szczególnie przy powierzchni czołowej stempla. Negatywny wpływ sprężynowania powinien być uwzględniony poprzez odpowiednią korekcję kształtu narzędzi modelowych.

Pełzanie

Pełzanie niemetalicznych materiałów modelowych zachodzi już przy temperaturze pokojowej, natomiast w przypadku metali uwidacznia się szczególnie wyraźnie przy podwyższonych temperaturach. Z tego względu znacznie prostsze jest przeprowadzenie symulacji obróbki plastycznej na gorąco, gdyż udział odkształceń plastycznych powodowanych zjawiskiem pełzania w odkształcanym modelu jest zbliżony do tych samych odkształceń występujących w procesie rzeczywistym. Podczas symulacji procesów obróbki plastycznej na zimno zjawisko pełzania oraz towarzysząca mu relaksacja naprężeń może prowadzić do błędnych wyników.

Adhezja

Adhezja na powierzchni kontaktu materiału z narzędziem zarówno w procesach rzeczywistych jak i modelowych jest zjawiskiem niekorzystnym. W przypadku eksperymentów modelowych może ona w znaczny sposób zmienić kierunek płynięcia materiału oraz prowadzić do powstawania licznych pęknięć na powierzchni zewnętrznej próbki.

Jako przykład może posłużyć proces walcowania, w którym wskutek nadmiernej adhezji, arkusze i profile po przejściu przez kotlinę walcowniczą mogą zostać ponownie chwyczone przez walce i dalej odkształcone.

Zjawisko adhezji nabiera szczególnego znaczenia w przypadku wykorzystywania bardzo lepkich środków smarnych takich jak np. wazelina. Problem przywierania

materiału modelowego próbki do powierzchni narzędzi można rozwiązać poprzez zastosowanie podwójnej warstwy bibuły, papieru ściernego lub innego suchego środka smarnego takiego jak talk, czy też grafit.

Uwięzione powietrze

W przypadku niemetalicznych materiałów modelowych, których granica plastyczności jest kilkaset razy mniejsza aniżeli materiałów rzeczywistych, pęcherze powietrza występujące pomiędzy narzędziami a próbką oraz w objętości samej próbki powodują wzrost jej ściśliwości i mają duży wpływ na wypełnianie całego wykroju matrycy. Aby umożliwić ujście powietrza, a tym samym wyeliminować wady wyrobów, narzędzia modelowe należy wyposażyć w dodatkowe otwory odpowietrzające. Nie możliwe staje się wówczas wykorzystanie w eksperymencie modelowym istniejących już narzędzi rzeczywistych. Narzędzia modelowe można odlać, w takim przypadku w formie będącej pozytywem narzędzi rzeczywistych, a następnie wykonać odpowiednie otwory odpowietrzające.

Sprężysta deformacja narzędzia

Istotny wpływ na sposób płynięcia materiału w procesie rzeczywistym może wywierać sprężysta deformacja narzędzia. Należy wówczas dążyć do tego, aby stosunek modułu Young'a materiału narzędzia modelowego do jego granicy plastyczności odpowiadał temuż stosunkowi dla narzędzia rzeczywistego.

Wyniki eksperymentów pokazują, że niewłaściwy dobór modułu sprężystości narzędzi modelowych może prowadzić do błędnych wyników, jak ma to miejsce np. podczas symulacji kucia obwodowego.

Odkształcenie sprężyste maszyny

W przypadku, gdy na przebieg realizowanego procesu mają wpływ sprężyste odkształcenia maszyny, jej sztywność w eksperymencie modelowym powinna być dobrana odpowiednio do sztywności maszyny rzeczywistej.

Na podstawie powyższych informacji wynika, że ogromnie ważne jest przestrzeganie tych samych i ściśle określonych procedur, zarówno samego przygotowania materiału, jak i realizacji eksperymentów przy użyciu niemetalicznych, miękkich materiałów modelowych, co wpływa na poprawność i powtarzalność uzyskiwanych wyników.

2.5. Zjawisko tarcia oraz sposoby jego oceny w procesach kształtowania plastycznego materiału

Rola tarcia w procesach kształtowania plastycznego materiału jest dość istotna, a zjawisko tarcia jest zazwyczaj zasadniczym czynnikiem, który dla wielu procesów obróbki plastycznej ma decydujący wpływ na sposób odkształcania materiału (powodując zmiany zarówno na jego powierzchniach, jak i w jego strukturze wewnętrznej) oraz siły kształtujące. Tarcie, poza nielicznymi wyjątkami wywiera najczęściej niekorzystny wpływ. Powoduje m.in.: błędy w prawidłowym płynięciu materiału, zużycie narzędzi, znaczny wzrost obciążeń, defekty wewnętrzne i powierzchniowe, a w bezpośrednim efekcie niejednorodność pola odkształceń oraz pola rozkładu temperatury. Jednakże to właśnie dzięki tarcia można przeprowadzać większość procesów kształtowania plastycznego. Dlatego podstawowym zagadnieniem w procesach kształtowania plastycznego jest właściwe zdefiniowanie warunków tarcia, co związane jest z poznaniem i określeniem wszystkich czynników oraz zjawisk wpływających na wielkość tarcia.

Analiza zagadnienia tarcia i smarowania jest bardzo trudna, gdyż zjawiska powierzchniowe towarzyszące tym procesom zależą od szeregu czynników oddziałujących zarówno na sam materiał, jak i na narzędzia. Przy czym charakter poszczególnych czynników jest często odmienny i nie do końca poznany. Coraz częściej prowadzone są więc badania wpływu poszczególnych czynników oraz próby ich uwzględnienia w opisie siły tarcia lub też współczynników tarcia.

W rozdziale przedstawiono zebrane metody testowe dotyczące określenia wielkości tarcia w procesach obróbki plastycznej analizując je pod kątem zastosowania ich do odkształcania miękkich materiałów modelowych, symulujących zachowanie się materiałów rzeczywistych.

Badania symulacyjne

Badania dotyczące symulacji warunków tarcia i smarowania występujące w procesach kształtowania plastycznego materiału można podzielić na [130]:

- testy symulujące procesy,
- testy symulujące warunki tribologiczne.

Testy symulujące procesy modelują typowe operacje przeróbki plastycznej, zachowując ich kinematykę. Testy symulujące warunki tribologiczne modelują natomiast określone zjawisko, dając możliwość pełnej kontroli warunków na nie wpływających. W tym przypadku zachodzi konieczność wprowadzenia istotnego odstępstwa od kinematyki procesu rzeczywistego. W obydwu grupach testów tribologicznych możliwa jest ich realizacja:

- z bezpośrednim pomiarem badanego parametru,
- z pośrednim pomiarem interesującego parametru.

W testach „bezpośrednich” następuje rzeczywisty pomiar naprężeń tarcia na powierzchni kontaktu (jako wartość średnia lub jako wartość lokalna). W testach „pośrednich” dokonuje się pomiaru zmiany wymiarów geometrii próbek, a następnie, w oparciu o istniejące modele teoretyczne wyznacza wartości współczynnika (czynnika) tarcia.

Testy symulujące procesy, w szczególności przy użyciu miękkich materiałów modelowych obejmują modelowanie procesów rzeczywistych, w których dominują naprężenia ściskające, a zatem procesy spęczania, kucia, wyciskania, walcowania. Przy czym, testy symulujące procesy są względnie łatwe do zaprojektowania i wykonania.

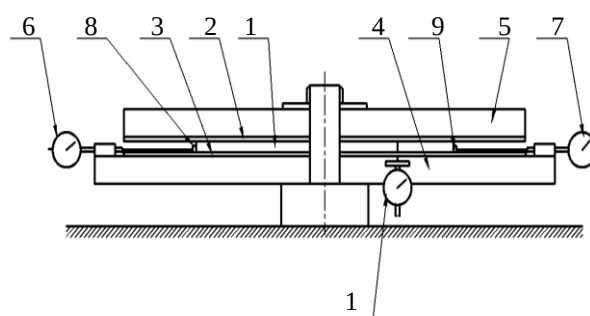
Z kolei testy symulujące warunki tribologiczne z reguły mają za zadanie określić wartości współczynników tarcia w warunkach odkształcenia plastycznego całego obszaru lub odkształcenia plastycznego ściśle zlokalizowanego. Trudności pojawiają się z interpretacją wyników uzyskanych dla materiałów modelowych, bowiem w rzeczywistych procesach często mamy do czynienia z dużymi wartościami nacisków normalnych i stycznych, natomiast w modelowaniu fizycznym, uwzględniając niskie własności wytrzymałościowe materiałów modelowych występują bardzo małe naciski.

Ponadto istotną sprawą jest, aby wybrana metoda testowa warunków tribologicznych, jak najlepiej odzwierciedlała geometrię danego procesu rzeczywistego lub jego symulacji, co więcej, aby wyniki badań laboratoryjnych potwierdzały się w warunkach przemysłowych.

2.5.1. Metody testowe dotyczące określenia wielkości tarcia

Test cygara (cigar test)

Próba ta umożliwia określenie warunków tarcia w przypadku niskich wartości współczynnika tarcia [48]. Z tego względu znalazła ona powszechne zastosowanie do wyznaczania tarcia między powierzchnią szyby a próbką wykonaną z miękkiego materiału modelowego w płaskim lub osiowo symetrycznym stanie odkształcenia, gdy szyba pełni rolę płaszczyzny symetrii. Schemat urządzenia do realizacji próby przedstawiono na rys. 2.5.1.1. Warunkiem poprawnego przebiegu testu jest odpowiedni

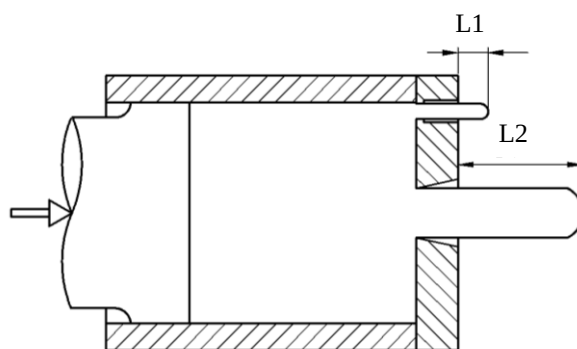


Rys. 2.5.1.1. Schemat urządzenia do ściskania próbki w teście cygara: 1-próbka, 2, 3-przegradki z akrylu, 4, 5-płyty stalowe, 6, 7- czujniki pomiaru długości próbki, 8, 9-końcówki czujników do pomiaru grubości próbki

kształt próbki. Wykonywana jest ona w postaci płyt, których długość jest znacznie większa aniżeli szerokość. Spęczanie tak przygotowanej próbki przez dwie równoległe i nieodkształcalne płyty, powoduje wzrost jej szerokości i długości. Jeśli współczynnik tarcia jest bliski zeru to zmiany wymiarów na szerokości i długości próbki będą równomierne. Gdy tarcie osiąga większe wartości następuje nieregularne odkształcanie próbki. Jej środek odkształca się bardziej aniżeli krawędzie i wówczas próbka przyjmuje charakterystyczny kształt cygara. Rejestrowane podczas eksperymentu zmiany wysokości i szerokości próbki nanosi się na krzywe kalibrujące, co umożliwia wyznaczenie współczynnika tarcia dla badanego materiału.

Metoda testowa dla procesu wyciskania

Symulowanie warunków tarcia występujących w procesach wyciskania jest bardziej skomplikowane aniżeli w przypadku innych prób. Wynika to bezpośrednio ze specyfiki samego procesu, w którym materiał może opuścić recypient tylko w jeden sposób: poprzez otwór w



Rys. 2.5.1.2. Metoda badań dla procesu wyciskania.

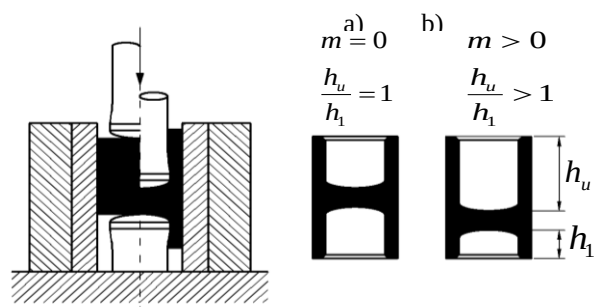
Stosunek długości $L1/L2$ wytłoczonych wyrobów służy jako wskaźnik wielkości tarcia.

matrycy. Niemożliwe jest więc wykorzystanie zmian geometrycznych wyrobu jako parametrów do wyznaczania tarcia. Może być ono jednak określone na podstawie kształtu i wielkości stref martwych w materiale, które tworzą się podczas wyciskania i zależą bezpośrednio od wartości tarcia pomiędzy pojemnikiem a materiałem próbki [148]. W celu realizacji tej próby należy uprzednio wykonać otwór o średnicy znacznie mniejszej od średnicy otworu podstawowego matrycy w pobliżu ścianki pojemnika. Metoda polega na pomiarze długości wyciśniętego przez oba otwory materiału (rys. 2.5.1.2). Wskutek tarcia prędkość płynięcia materiału w bezpośrednim sąsiedztwie ścianek matrycy jest mniejsza aniżeli w części środkowej. Porównanie długości elementu wyciśniętego przez dodatkowy otwór do długości wyrobu podstawowego umożliwia zgrubną ocenę warunków tarcia, decydujących o szybkości przemieszczania się materiału w strefie martwej.

Metoda testowa dla procesu wyciskania przedmiotów krótkich (double cup extrusion)

Standartowe zastosowanie do określania współczynnika tarcia dla procesów wyciskania przedmiotów krótkich znalazła próba wyciskania współbieżno-przeciwbieżnego naczyń cylindrycznych [18, 20, 114]. W metodzie tej wielkość tarcia określana jest na podstawie różnicy

wysokości górnej oraz dolnej ścianki wyciskanego naczynia. Schemat próby oraz końcowy kształt wyrobu przedstawiony został na rys. 2.5.1.3. Ruch górnego stempla w stosunku do nieruchomego pojemnika i stempla dolnego powoduje wpłynięcie materiału w szczeliny pomiędzy pojemnikiem a stemplami. W przypadku procesu beztarciowego lub bardzo małego

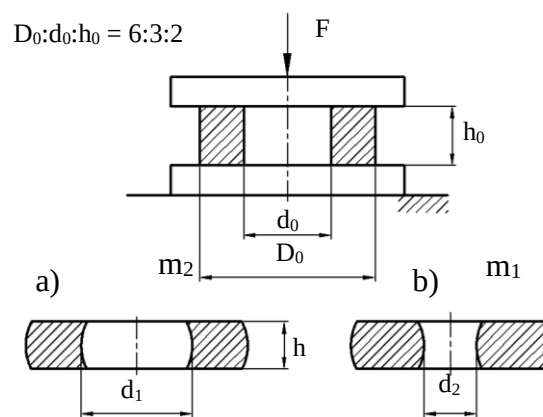


Rys. 2.5.1.3. Schemat próby wyciskania współbieżno-przeciwbieżnego oraz a) geometria próbki w przypadku smarowania wazeliną i b) dla smarowania stearynianem cynku

tarcia dolna i górna wysokość naczynia jest taka sama. Wzrost wartości tarcia powoduje zwiększenie się wysokości górnej ścianki a zmniejszenie dolnej. Ze względu na analogię w przebiegu procesu i warunków tarcia panujących podczas wyciskania współbieżno-przeciwbieżnego materiałów rzeczywistych oraz modelowych, metoda ta daje możliwość porównania jakości różnych smarów oraz pozwala na łatwy wybór mieszaniny smarującej dla eksperymentu modelowego. Uzyskanie takiej samej różnicy wysokości ścianek naczynia, jaka występuje w rzeczywistości świadczy, bowiem o właściwym doborze smaru. Według [130] próba ta daje również możliwość oceny jakości smarów w procesach kucia na zimno i gorąco.

Metoda spęczania pierścienia (ring test)

Spęczanie pierścienia jest najczęściej i najpowszechniej stosowaną metodą wyznaczania współczynnika tarcia oraz doboru rodzaju smarowania dla procesów kucia [97, 123]. Na podstawie licznie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla wymiarów próbek $D_0:d_0:h_0 = 6:3:2$ otrzymywane wyniki najbardziej odpowiadają uzyskiwanym w rzeczywistości (rys. 2.5.1.4). Podczas ściskania takiej próbki pomiędzy równoległymi, nieodkształcalnymi płytami

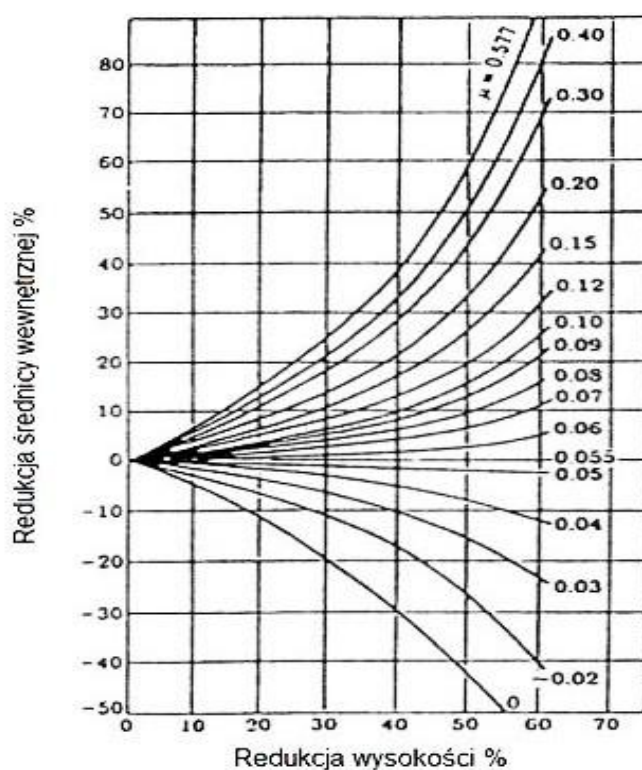


Rys. 2.5.1.4. Schemat spęczania pierścienia i wymiary próbek po spęczaniu dla różnych wartości współczynnika tarcia: $d_1 > d_0$, $d_2 < d_0$, $m_2 > m_1$

następuje zmiana jej wymiarów, która jest bezpośrednio związana z panującymi warunkami tarcia (rys. 2.5.1.4a). Przy małym tarcu pierścień ulega poszerzeniu i zwiększa się średnica wewnętrzna próbki. W przypadku dużych sił tarcia na pewnej średnicy materiał przywiera do narzędzia, a w związku z tym część materiału przemieszcza się do wewnątrz, a część – na zewnątrz (2.5.1.4b). Średnica wewnętrzna może więc zmniejszyć się lub w granicznym przypadku, nie zmienić się.

Metoda bardzo dobrze nadaje się do porównawczych badań tarcia w różnych warunkach, np. przy różnych smarach, różnych chropowatościach powierzchni narzędzi, itp.

Jeżeli nie jest potrzebna znajomość wartości współczynników tarcia to wystarczy porównać średnice wewnętrzne pierścieni po spęczaniu w różnych warunkach, przy czym wymiary początkowe badanych pierścieni oraz stopień odkształcenia muszą być identyczne. Im większą średnicę wewnętrzną pierścienia otrzymuje się po spęczaniu, tym mniejsze były siły tarcia. Wyznaczanie liczbowych wartości współczynników tarcia polega na porównaniu rzeczywistych wymiarów pierścieni po spęczaniu (średnicy wewnętrznej i wysokości) z rozwiązaniem teoretycznym, które opisuje wpływ tarcia na kształt spęczanego pierścienia. Wykorzystuje się do tego odpowiednie nomogramy lub wykresy (rys. 2.5.1.5), z których – dla znanych wymiarów h_0 , d_0 oraz h_1 i d_1 – można odczytać wartość współczynnika tarcia. Porównanie wyników testu pierścieniowego dla materiału rzeczywistego i modelowego pozwala określić, czy w obu przypadkach zachowane były identyczne warunki tarcia. Wyniki testu stanowią wytyczne odnośnie doboru środka smarnego.

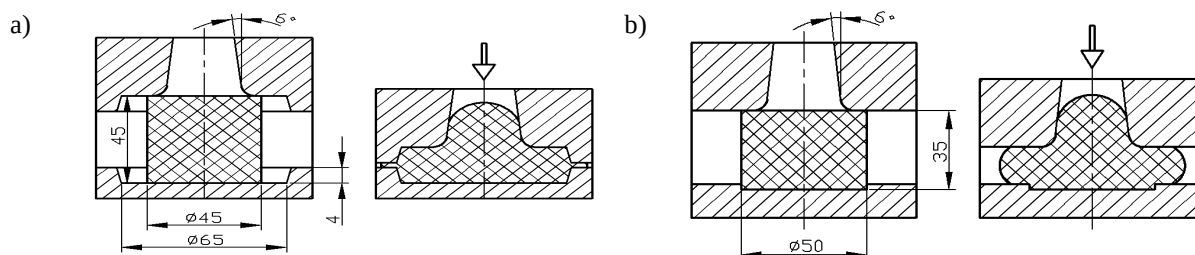


Rys. 2.5.1.5. Wykres służący do określania współczynnika tarcia w próbie pierścieniowej

Metoda testowa kucia z wypływką i bez wypływki

W procesie kucia intensywne płynięcie materiału występuje w okolicach zaokrągleń narzędzia. Panują tam bardzo złożone warunki tribologiczne determinujące powstawanie strefy martwej. Ważne jest, więc zapewnienie dobrej separacji pomiędzy materiałem próbki a tłoczniem.

Poważnym problemem związanym z tarciem jest prawidłowe wypełnienie dolnej i górnej matrycy. Badanie obu tych zjawisk umożliwia próba kucia próbki z wystającym trzpieniem (rys. 2.5.1.6). Przy czym, możliwe są dwa warianty procesu: kucie bez wypływki oraz kucie z wypływką.

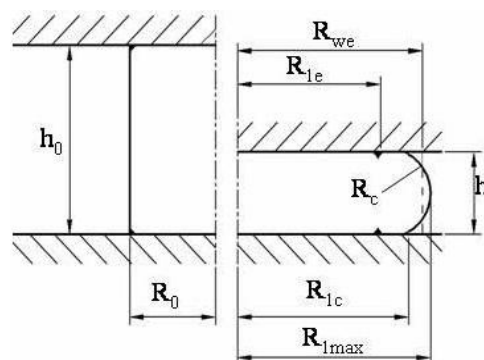


Rys. 2.5.1.6. Badanie symulacyjne dla procesu kucia a) bez wypłytki b) z wypływką

Polega ona na pomiarze wysokości trzpienia, która wyraża stosunki sił tarcia na powierzchniach poziomych odkuwki, powierzchniach zaokrąglenia oraz powierzchniach otworu. W przypadku dużych wartości tarcia na powierzchniach poziomych, wartość nacisków jednostkowych wzrasta i uzyskuje się dużą wysokość trzpienia. Jeżeli tarcie jest niskie, obniżają się również naciski oraz następuje zmniejszenie wysokości trzpienia.

Próba spęczania próbki walcowej

W próbie tej do określenia współczynnika tarcia, wykorzystuje się zjawisko nierównomierności odkształceń próbki walcowej, ściskanej pomiędzy dwoma równoległymi płytami (rys. 2.5.1.7). Po spęczaniu próbka przyjmuje postać beczki, która jest tym większa im większy jest współczynnik tarcia. Beczkowatość próbki, określona jako wartość odkształcenia względnego, opisana jest zależnością:



Rys. 2.5.1.7. Schemat spęczania próbki walcowej A – początkowe wymiary próbki, B – wymiary próbki po odkształceniu, a) linia przerywana – proces beztarciowy, b) linia ciągła – z tarcia

$$S_e = (A_{we} - A_{1e}) / A_{we} = 1 - (h_1 R_{1e}^2) / (h_0 R_0^2), \quad (2.5.1.1)$$

Wyznaczenie wpływu współczynnika tarcia na wartość tego wskaźnika na drodze analizy numerycznej MES oraz porównanie uzyskanych zależności z wynikami eksperymentalnymi pozwala na określenie wartości współczynnika tarcia dla procesu rzeczywistego. Modyfikacją tej metody jest, wprowadzona przez Siebela i Pompa, metoda stożków [36]. W tym przypadku ściskaniu poddawane są próbki cylindryczne z otworami stożkowymi, wykonanymi na ich powierzchniach czołowych. Podczas spęczania na powierzchniach bocznych stożków pojawia się siła normalna oraz siła tarcia. W zależności od ich stosunku próbka przybiera kształt wklęsły lub beczkowaty. Kąt pochylenia tworzącej stożka, dla którego spęczana próbka zachowa kształt cylindryczny, odpowiada kątowi tarcia a jego tangens określa współczynnik tarcia.

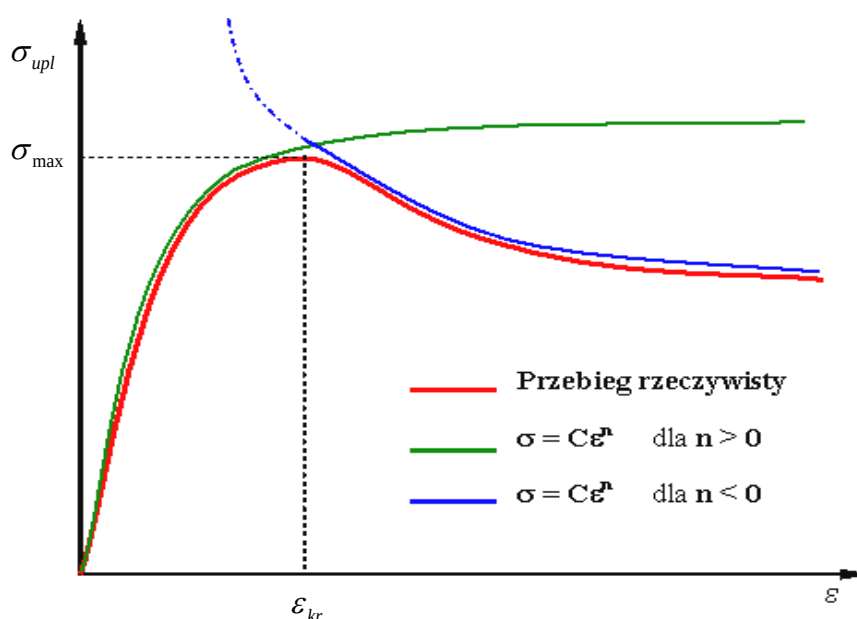
Zebrane i przedstawione powyżej metody testowe dotyczące oceny warunków tribologicznych, jakie panują przede wszystkim w procesach spęczania, wyciskania i kucia na zimno lub gorąco miękkich materiałów modelowych, mają charakter pośredni. Niewiele z nich umożliwia w szybki i prosty sposób wyznaczyć siły tarcia. Większość z nich, poza oczywiście próbą pierścieniową, to metody nowatorskie do końca niepotwierdzone i wymagające przy tym odpowiedniego oprzyrządowania oraz specjalnych narzędzi. Należy również wspomnieć, że żadna z zaprezentowanych metod nie uwzględnia niejednorodności pola odkształceń i tym samym do obliczeń przyjmowane są wartości uśrednione, co w efekcie prowadzi do niedokładności obliczeń.

2.6. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie jako warunek podobieństwa plastycznego

Zachowanie się materiału w trakcie odkształcania plastycznego odzwierciedlają uogólnione krzywe umocnienia, wyrażające zmianę naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia plastycznego. Określenie związku pomiędzy naprężeniem a odkształceniem ma duże znaczenie praktyczne. Pozwala na ustalenie parametrów obróbki plastycznej oraz właściwości kształtowanych elementów. W przypadku modelowania fizycznego znajomość krzywych umocnienia jest szczególnie istotna, gdyż wiąże się bezpośrednio z warunkiem podobieństwa materiału rzeczywistego oraz modelowego w zakresie plastycznym.

Powszechnie przyjmuje się, że warunek podobieństwa plastycznego w modelowaniu fizycznym jest spełniony, gdy materiał modelowy podczas odkształcania plastycznego zachowuje się tak samo, jak materiał rzeczywisty. Ponieważ o zachowaniu się materiału podczas odkształcenia decyduje krzywa umocnienia, warunek ten można sprowadzić do dobrania odpowiedniej krzywej umocnienia materiału modelowego. Krzywe te przedstawione mogą być w formie graficznej lub numerycznej. Coraz powszechniejszą staje się metoda aproksymowania wyników doświadczeń za pomocą bardziej lub mniej złożonych funkcji. W zdecydowanej większości publikacji dotyczących metod modelowania fizycznego do opisu krzywej umocnienia przyjmuje się, przedstawione w rozdziale 2.4.1, równanie Hollomona (2.4.1.1) lub uwzględniające stopień i prędkość odkształcenia równanie Aldera i Philipsa (2.4.1.3). W tym przypadku spełnienie warunku podobieństwa plastycznego oznacza, że odpowiednie współczynniki równania dla materiału rzeczywistego i modelowego muszą być sobie równe. Badania prowadzone w różnych ośrodkach naukowych, jak również przez autora wykazują, że przyjęty w tej postaci warunek podobieństwa jest niewystarczający.

Dotyczy to przede wszystkim obróbki plastycznej na gorąco, kiedy materiał w początkowym zakresie odkształcania umacnia się, natomiast dla odkształceń większych od odkształcenia krytycznego ε_{kr} , któremu odpowiada naprężenie maksymalne σ_{max} , ulega osłabieniu (rys. 2.6.1). Przyjęcie stałego, większego od zera współczynnika umocnienia zakłada natomiast monotoniczny wzrost naprężenia w całym zakresie odkształceń. Niektórzy autorzy, aby opisać osłabienie materiału, przyjmują ujemną wartość współczynnika pomijając tym samym obszar do odkształceń krytycznych [10-12,147,148]. Podczas modelowania procesów obróbki na gorąco należałoby, więc cały zakres odkształceń na krzywej umocnienia podzielić na dwa zakresy i każdy z nich opisać odrębną zależnością lub przyjąć bardziej złożone modele zachowania się materiału uwzględniające procesy w nim zachodzące. Zróżnicowany przebieg naprężenia uplastyczniającego materiałów rzeczywistych tłumaczy się procesami zdrowienia i rekrytalizacji. Zjawiska te nie występują podczas odkształcania niemetalicznych materiałów modelowych i uwzględnienie ich ilościowego udziału stwarza wiele problemów.



Rys. 2.6.1. Aproxymacja krzywej $\sigma_{upl} - \varepsilon$ dla materiału w warunkach obróbki plastycznej na gorąco

Stosowanie bardzo rozbudowanych funkcji jest utrudnione ze względu na konieczność wyznaczania wielu parametrów występujących w takich równaniach. Trudne staje się również w tym przypadku określenie i spełnienie warunku podobieństwa pomiędzy materiałem rzeczywistym i modelowym. Dla bardzo skomplikowanych funkcji lub zastosowania różnego opisu matematycznego krzywej umocnienia materiału modelowego oraz materiału rzeczywistego znalezienie takiego warunku może okazać się niemożliwe.

Jednym z modeli opisujących zmianę naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia plastycznego materiału ulegającego umocnieniu oraz osłabieniu jest równanie konstytutywne:

$$\sigma_p = C_{1rz(m)} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{a}\right) \right]^n - \Delta\sigma, \quad (2.6.1)$$

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 0 & \text{dla } \varepsilon < \varepsilon_{kr} \\ (C_{1rz(m)} - C_{2rz(m)}) [1 - \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_c))]^{n_1} & \text{dla } \varepsilon > \varepsilon_{kr} \end{cases}, \quad (2.6.2)$$

gdzie: ε – odkształcenie,

ε_{kr} – odkształcenie krytyczne,

$C_{1rz(m)}$, $C_{2rz(m)}$, a , b , n , n_1 – stałe materiałowe.

Stowarzyszony z nim warunek podobieństwa w zakresie plastycznym wymaga równości następujących współczynników a , b , n , n_1 , ε_{kr} dla materiału modelowego i rzeczywistego. Ponadto powinien być równy stosunek współczynników $C_{1rz} / C_{1m} = C_{2rz} / C_{2m} = C$ – współczynnik skali.

Innym kryterium podobieństwa, jest warunek zaproponowany przez Finer'a, Kivivouri'ego oraz Kleemola oparty na prostszym równaniu [47]:

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m (1 + \beta \Delta T), \quad (2.6.3)$$

gdzie: K – stała materiałowa,

β – współczynnik rozszerzalności objętościowej,

ΔT – przyrost temperatury,

n – współczynnik umocnienia,

m – współczynnik czułości na prędkość odkształcania,

$$\text{dla } \varepsilon_{kr} < 0,3 \quad K_1, n_1, m_1, \beta_1,$$

$$\text{dla } \varepsilon_{kr} > 0,3 \quad K_2, n_2, m_2, \beta_2.$$

Stowarzyszony z nim warunek podobieństwa w zakresie plastycznym wymaga równości współczynników: K_1 , n_1 , m_1 , β_1 , K_2 , n_2 , m_2 , β_2 dla materiału modelowego i rzeczywistego.

Powyższe, rozbudowane opisy krzywych umocnienia i stowarzyszone z nimi warunki podobieństwa posiadają zarówno wady jak i zalety.

Pierwszy z modeli (2.6.1 i 2.6.2) jest bardzo uniwersalny, gdyż pozwala opisywać zachowanie się materiału zarówno w warunkach obróbki plastycznej na zimno (drugi człon równania jest równy zero) jak i na gorąco. Nie uwzględnia on jednak wpływu prędkości odkształcania na przebieg naprężenia uplastyczniającego. Wprowadzenie dodatkowo współczynnika określającego czułość na prędkość odkształcania skomplikowałoby znacznie postać zaproponowanych warunków podobieństwa w zakresie plastycznym, tym bardziej, że na ogół materiały modelowe są bardziej czułe na zmianę prędkości odkształcania niż materiały rzeczywiste. Istotnym utrudnieniem w stosowaniu powyższego modelu są duże trudności związane z wyznaczaniem wielu współczynników w nim występujących.

Drugi opis (2.6.3), uwzględnia zarówno prędkość odkształcania oraz dodatkowe parametry takie jak zmianę temperatury oraz rozszerzalność cieplną materiału. Jego wadą są błędy wynikające z niepełnego dostosowania do przebiegów rzeczywistych, a tym samym brak dokładnego określenia jego dokładności.

Z przytoczonych rozważań wynika, że podstawowym problemem w matematycznym opisie warunku podobieństwa plastycznego są:

- ✓ Różnicowany charakter zmian naprężenia uplastyczniającego w zależności od materiału i warunków odkształcania.
- ✓ Trudność w przyjęciu jednakowego modelu płynięcia dla materiału modelowego i rzeczywistego uwzględniającego wszystkie istotne, choć z reguły odmienne zjawiska towarzyszące odkształcaniu tychże materiałów.
- ✓ Przyjęcie zbyt złożonych funkcji matematycznych nastęrcza dużych trudności przy wyznaczaniu odpowiednich współczynników równań, co sprawia, że określenie warunku podobieństwa między materiałem rzeczywistym a modelowym może okazać się niemożliwe.
- ✓ Stosując prostsze funkcje można w łatwy sposób zapewnić warunek podobieństwa plastycznego, jednakże można wówczas popełnić istotne błędy, przyjmując niepoprawne założenia lub zbytne uproszczenia.
- ✓ Najlepszy nawet model matematyczny opisujący materiał obarczony jest błędem. Z tego powodu należy operować rzeczywistymi przebiegami naprężenia uplastyczniającego uzyskiwanymi bezpośrednio z prób plastometrycznych.

3. PODSUMOWANIE BADAŃ LITERATUROWYCH

Analiza stanu zagadnienia wykazała, że prowadzi się obecnie dużo eksperymentów z wykorzystaniem metod fizycznego modelowania procesów kształtowania plastycznego materiału. Modelowanie fizyczne przy użyciu miękkich materiałów modelowych jest metodą dostarczającą informacji, które byłyby trudne, zbyt kosztowne lub wręcz niemożliwe do uzyskania innymi metodami. Znacznie ułatwia ono również projektowanie narzędzi do otrzymywania nowych wyrobów o skomplikowanych kształtach a nawet urządzeń do przeróbki plastycznej metali, podczas gdy istniejące rozwiązania teoretyczne, bazujące na najnowszych metodach obliczeniowych, w wielu przypadkach jedynie w sposób przybliżony oddają rzeczywistość. Z tego względu modelowanie fizyczne stało się jedną z najpopularniejszych metod modelowania procesów kształtowania plastycznego, a w szczególności obróbki objętościowej.

Ograniczenia w zastosowaniu modelowania fizycznego związane są głównie z brakiem możliwości spełnienia poszczególnych warunków podobieństwa, co wynika m.in. ze specyficznych właściwości miękkich materiałów modelowych.

Decydującym o doborze materiału modelowego do materiału rzeczywistego jest warunek podobieństwa w zakresie plastycznym. Sprowadza się on do dobrania odpowiedniej krzywej umocnienia materiału modelowego, która swoim kształtem jest najbardziej zbliżona do kształtu krzywej umocnienia materiału rzeczywistego. Krzywe $\sigma_{upl} - \varepsilon$ są najczęściej przedstawiane w postaci mniej lub bardziej złożonych funkcji matematycznych. Główny problem matematycznego opisu naprężenia uplastyczniającego polega na uwzględnieniu jego zmian w zależności od materiału i warunków odkształcenia. Stosowane powszechnie uproszczone modele krzywych umocnienia są niewystarczające i mogą prowadzić do poważnych błędów podczas analizy parametrów siłowych modelowanych procesów. Natomiast przyjęcie bardziej rozbudowanych funkcji opisujących naprężenie uplastyczniające naraża z kolei dużych trudności przy wyznaczaniu współczynników w tych modelach. Wówczas określenie warunku podobieństwa między materiałem rzeczywistym a modelowym może okazać się niemożliwe. Dlatego niezbędne jest stworzenie nowego warunku podobieństwa plastycznego, który nie posiadałby wymienionych ograniczeń.

W modelowaniu fizycznym idealne dopasowanie krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie materiału modelowego do krzywych materiału rzeczywistego praktycznie jest niemożliwe, dlatego nowy warunek powinien również dawać możliwość oszacowania poprawności modelowania fizycznego na podstawie stopienia dopasowania krzywej umocnienia materiału modelowego do rzeczywistego.

4. CEL BADAŃ I TEZA PRACY

Dokładność modelowania fizycznego procesów rzeczywistych zależy głównie od spełnienia następujących warunków podobieństwa między modelem fizycznym a procesem rzeczywistym: podobieństwa materiału w zakresie plastycznym, podobieństwa warunków tarcia, podobieństwa termicznego, podobieństwa geometrycznego oraz podobieństwa materiału w zakresie sprężystym i dynamicznym. W przypadku procesów kształtowania plastycznego materiału najważniejszy jest warunek podobieństwa plastycznego.

Celem pracy jest stworzenie nowego warunku podobieństwa plastycznego między materiałem modelowym a rzeczywistym i ustalenie jego wpływu na dokładność modelowania fizycznego na przykładzie procesów wyciskania. Wymaga to zachowania pozostałych warunków podobieństwa. W tym celu w zastosowanych procesach przyjęto: małe prędkości odkształcenia, przy których dynamika procesów może być pominięta, duże odkształcenia plastyczne, przy których odkształcenia sprężyste nie odgrywają większej roli, izotermiczne warunki odkształcania, taką samą geometrię oraz dobrano niemal identyczne warunki tarcia w modelowaniu fizycznym i w procesie rzeczywistym.

Opracowanie nowego warunku podobieństwa plastycznego pozwoli stworzyć sformalizowane procedury budowania modeli fizycznych rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego o dającej się oszacować dokładności.

Celem dodatkowym pracy jest budowa bazy danych ułatwiająca dobór materiałów do modelowania fizycznego rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego.

Otrzymane wyniki badań powinny przyczynić się do:

- określenia dokładności dopasowania modelu fizycznego do opisu rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego w zależności od stopnia spełnienia warunku podobieństwa plastycznego materiału modelowego do materiału rzeczywistego,
- kompleksowej oceny przydatności modelowania fizycznego do analizy i projektowania rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego, pozwalającej zminimalizować konieczność stosowania rzeczywistego eksperymentu,
- poznania i wyjaśnienia zjawisk dotyczących umacniania i osłabiania się miękkich materiałów modelowych na bazie syntetycznego wosku filia i plasteliny podczas ich odkształcania.

Przedstawione cele pracy opierają się na następującej tezie:

Nowy matematyczny opis warunku podobieństwa plastycznego, przy zachowaniu pozostałych warunków podobieństwa, pozwala oszacować dokładność modelu fizycznego procesu rzeczywistego.

Praca jest realizowana poprzez analizę i porównanie fizycznych modeli procesów wyciskania z ich rzeczywistymi odpowiednikami.

Rezultaty przedstawionych badań w powiązaniu z modelowaniem numerycznym mogą być użyte do optymalizacji i analizy dotychczasowych rozwiązań technologicznych rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego materiału oraz opracowania nowych sformalizowanych procedur pozwalających budować modele matematyczne i fizyczne procesów kształtowania plastycznego o dającej się oszacować dokładności.

5. METODYKA BADAŃ

Osiągnięcie założonego celu pracy wymagało realizacji następujących zadań:

- Opracowanie nowego opisu warunku podobieństwa plastycznego.
- Zaprojektowanie i przygotowanie Laboratorium Modelowania Fizycznego.
- Dobór i przygotowanie materiałów rzeczywistych.
- Badania doświadczalne i analiza wybranych procesów kształtowania.
- Dobór i przygotowanie materiałów modelowych.
- Badania doświadczalne przy użyciu materiałów modelowych.
- Wyznaczenie wpływu zachowania warunku podobieństwa plastycznego materiałów rzeczywistych i modelowych na dokładność odwzorowania procesów rzeczywistych poprzez modelowanie fizyczne.

5.1. Nowy opis warunku podobieństwa plastycznego w modelowaniu fizycznym

W pracy zaproponowano nowy opis warunku podobieństwa plastycznego, który pozwala na oszacowanie dokładności modelu fizycznego. Przyjmuje się w nim ilościową ocenę stopnia dopasowania kształtu krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie materiału modelowego i rzeczywistego. W opisie tym wyznaczane są dwa parametry: współczynnik skali:

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \frac{\sigma_i^{rz}}{\sigma_i^m}, \quad (5.1.1)$$

oraz współczynnik podobieństwa:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^k \left| \frac{\sigma_i^{rz}}{\sigma_i^m} - C \right|}{\frac{2}{k}}, \quad (5.1.2)$$

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

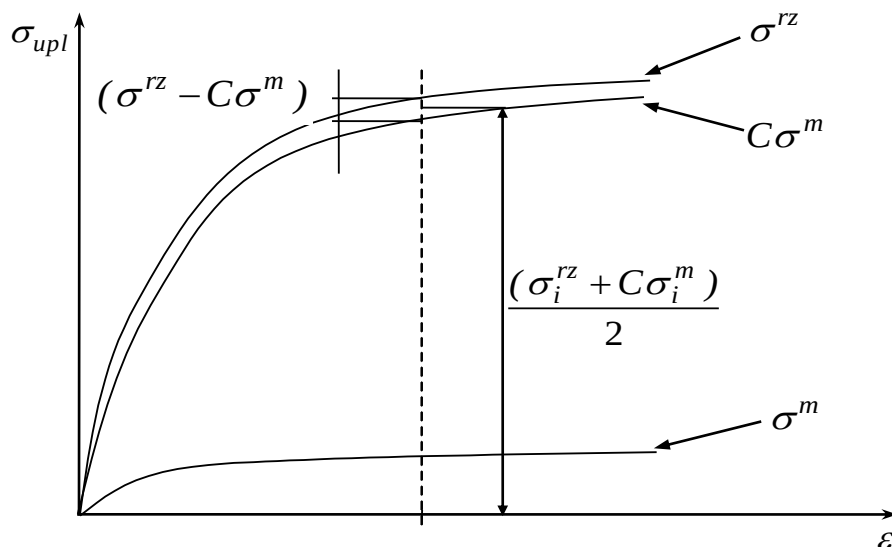
σ_i^m – naprężenia uplastyczniające materiału modelowego w punkcie i ,

k – liczba punktów, na krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego, dla których wyznaczono współczynnik podobieństwa.

Współczynnik t jest wielkością bezwymiarową, która pozwalała w sposób prosty i szybki określić stopień dopasowania krzywej umocnienia materiału modelowego do rzeczywistego.

W przypadku teoretycznie idealnego dopasowania obu krzywych współczynnik ten powinien

być równy zero. Na rys. 5.1.1 przedstawiono interpretację graficzną wielkości występujących w równaniach (5.1.1) i (5.1.2).



Rys. 5.1.1. Interpretacja geometryczna wielkości występujących w równaniu (5.1.1) i (5.1.2)

W celu uwzględnienia, w omawianym opisie, czułości materiału na prędkość odkształcania wyznaczone są średnie wartości współczynnika skali t_{sr} i podobieństwa C_{sr} z ich wartości dla określonych prędkości odkształcania, opisane następująco:

$$t_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n t_i, \quad (5.1.3)$$

$$C_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n C_i, \quad (5.1.4)$$

gdzie: t_i – parametr t dla prędkości odkształcania i ,
 C_i – parametr C dla prędkości odkształcania i ,
 n – ilość różnych prędkości, dla których wyznaczano parametr t_{sr} , C_{sr} .

Dodatkową zaletą nowego opisu warunku podobieństwa plastycznego jest operowanie na rzeczywistych przebiegach naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcania i prędkości odkształcania. Nie ma, zatem konieczności opisywania krzywej umocnienia funkcją matematyczną oraz wyznaczaniem szeregu współczynników równania (tym samym nie popełniania błędów wynikających z niedostatecznego dopasowania wybranej funkcji matematycznej do przebiegu rzeczywistego).

5.2. Laboratorium do modelowania fizycznego

W celu realizacji modelowania fizycznego w Zakładzie Inżynierii Procesów Kształtowania Plastycznego Politechniki Wrocławskiej została zbudowana specjalistyczna pracownia – Laboratorium Modelowania Fizycznego. Laboratoria do modelowania fizycznego nie należą już do rzadkości i są obecnie coraz częściej spotykane zarówno w instytucjach naukowo – badawczych jak w przedsiębiorstwach przemysłowych. Powszechnie znane są: laboratoria w Denmark Technical University w Lyngby, w Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing Ohio State University w USA, czy też laboratoria na Politechnice Warszawskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej. Koncepcja laboratorium oraz projekty większości urządzeń i narzędzi do tego laboratorium zostały opracowane przez autora [68].

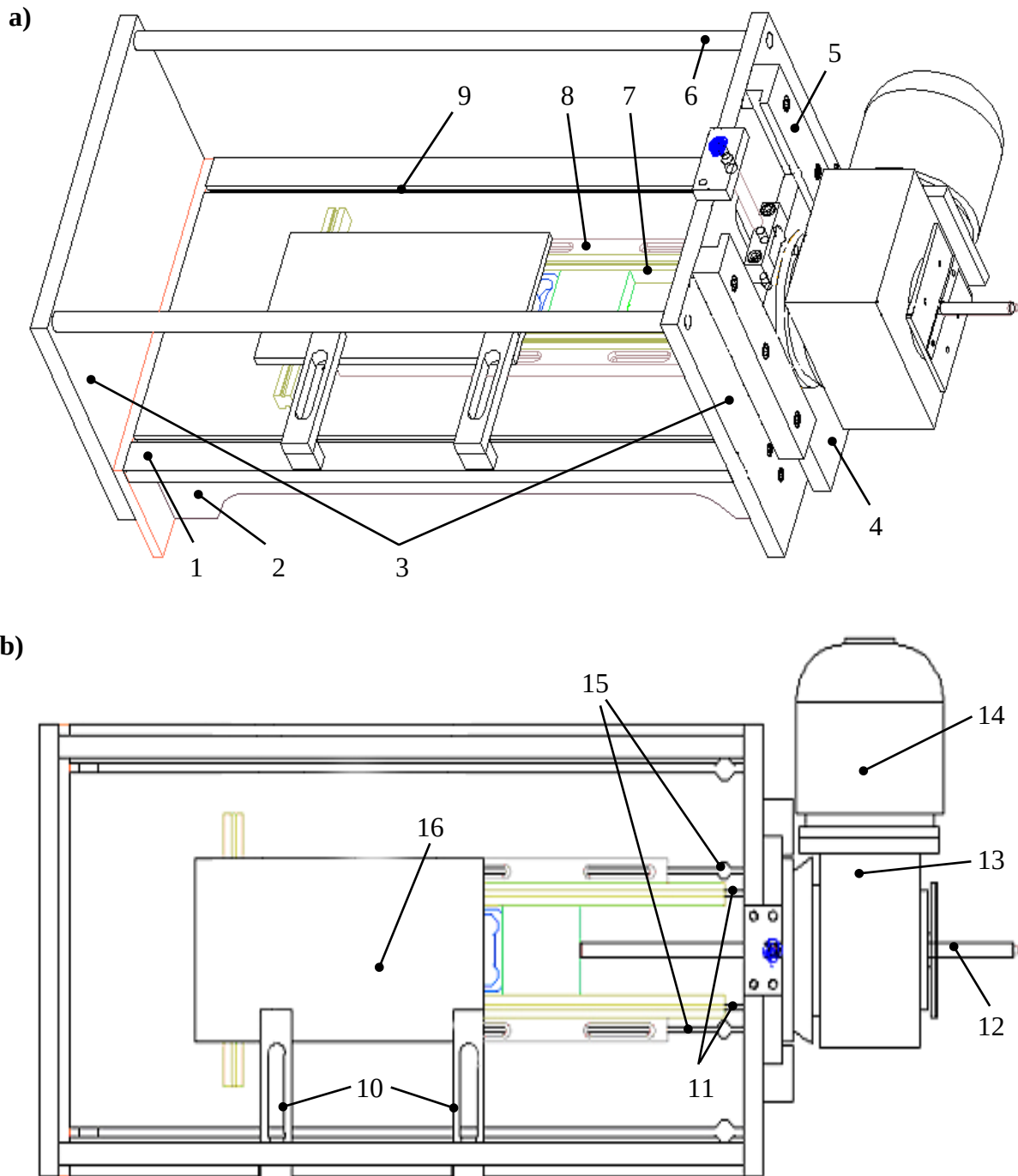
Podstawowym stanowiskiem do odkształcania materiałów modelowych, w głównej mierze uwzględniającym realizację procesów kształtowania materiałów modelowych w płaskim i osiowo-symetrycznym stanie odkształcania była uniwersalna prasa wraz z systemem sterująco-archiwizacyjnym. Podczas konstruowania jej uwzględniono również możliwość realizacji w przyszłości bardziej złożonych stanów odkształcenia, w tym przestrzennej, trójwymiarowej deformacji materiału.

Na rys. 5.2.1 przedstawiono schemat konstrukcyjny omawianej prasy do odkształcania materiałów modelowych wraz z opisem najważniejszych części, wykonany w programie Pro/Engineer.

Urządzenie do kształtowania materiałów modelowych jest zbudowane z płyty głównej-stołowej (1), na której znajdują się listwy prowadzące (7) i mocujące (8). Dodatkowo w płycie stołowej zostały wykonane 2 rowki zwykłe (11) pozwalające na zamocowanie listew prowadzących oraz 4 rowki teowe, z których dwa krótsze (15) w środkowej części stołu służą do ustalania położenia listew mocujących, zaś dwa pozostałe (9) do mocowania łapek (10), przytrzymujących szybę (16), przez którą jest możliwość fotografowania bądź filmowania całego eksperymentu. Cały stół jest przymocowany do specjalnie zaprojektowanej konstrukcji nośnej składającej się z dwu płyt bocznych (3) i płyt stanowiących podstawę (2).

Urządzeniem napędowym jest motoreduktor firmy Lenze, w którego skład wchodzi: przekładnia stożkowa o zębach skośnych (13) oraz silnik trójfazowy (14) o mocy 1kW i momencie obrotowym na wyjściu 15 Nm. Motoreduktor jest przymocowany do płyty silnikowej (4), zamocowanej w prowadnicach (5), która posiada regulację w płaszczyźnie pionowej stołu, umożliwiającą dostosowanie położenia stempla do realizacji poszczególnych

procesów dla różnych kształtów i wymiarów próbek. Za pomocą układu nakrętka-śruba, ruch obrotowy wałka motoreduktora jest zamieniany na ruch prostoliniowy śruby (12), która jest połączona ze stemplem prasy. Maksymalna wartość siły kształtowania wynosi 7 kN, zaś maksymalna prędkość stempla prasy około 60 mm/s. Sterowanie motoreduktorem odbywa się przy pomocy falownika.



Rys. 5.2.1. Schemat projektu konstrukcji prasy: a) w izomerii oraz b) w rzucie z góry 1 – płyta główna, 2 – podstawa, 3 – płyty boczne, 4 – płyta silnikowa, 5 – prowadnice, 6 – spinacz, 7 – listwa prowadząca, 8 – listwa mocująca, 9 – rowki zwykłe, 10 – łapki, 11 – rowki teowe ustalające położenie listew, 12 – śruba o gwincie trapezowym symetrycznym, 13 - przekładnia stożkowa o zębach skośnych, 14 - silnik trójfazowy, 15 - rowki teowe do mocowania łapek, 16 – szyba

W przypadku realizowania w przyszłości bardziej złożonych stanów odkształcenia jest możliwość zamocowania dodatkowych narzędzi do płyty stołowej między innymi za pomocą spinaczy (6).

System sterująco-archiwizacyjny składa się z: czujnika siły firmy ZEPWN o zakresie 0÷5 kN, czujnika indukcyjnego Hottinger o zakresie 0÷200 mm, wzmacniaczy Hottingera oraz komputera z aplikacjami napisanymi w środowisku LabView umożliwiającymi odczyt danych z czujników poprzez 16 bitową kartę pomiarową National Instruments (rys. 5.2.2).



Rys. 5.2.2. Zdjęcie stanowiska do realizacji eksperymentów przy użyciu materiałów modelowych

Poza przedstawioną uniwersalną prasą, Laboratorium Modelowania Fizycznego wyposażone jest w klimatyzator oraz urządzenia i narzędzia umożliwiające przygotowanie materiałów modelowych, takie jak:

- stół wibracyjny (rys. 5.2.3), służący do zagęszczania, odgazowywania i uzyskiwania odpowiedniej konsystencji kompozycji materiału modelowego,
- przecinarka strunowa (rys. 5.2.4), służąca do planowania i cięcia próbek na określone wymiary z materiałów modelowych,
- stanowisko do nanoszenia siatek koordynacyjnych metodą sitodruku (rys. 5.2.5),
- formy o różnych kształtach do odlewania próbek -w zależności od realizowanych procesów obróbki kształtowania plastycznego, próbki do badań odlewano w postaci płyt (rys. 5.2.6) lub walców,

oraz

- zamrażarka do przechowywania form z materiałami modelowymi,
- szereg narzędzi kształtujących,
- kamera i aparaty cyfrowe umożliwiające rejestrację eksperymentów,
- materiały modelowe (plasteliny, woski) i odpowiednie materiały modyfikujące, takie jak: kaolin, kreda, lanolina, parafina i wazelina.



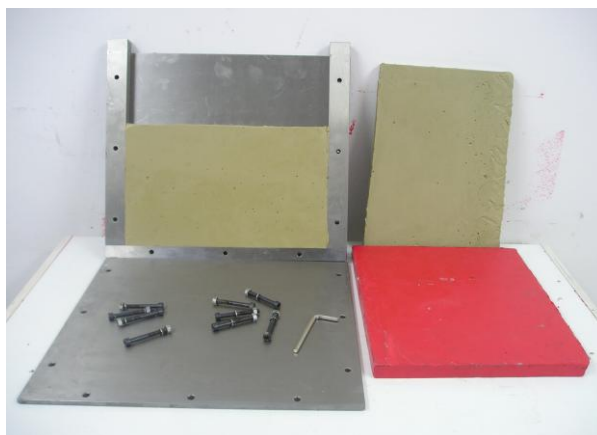
Rys. 5.2.3. Stół wibracyjny wraz z zamontowaną formą napełnioną materiałem modelowym



Rys. 5.2.4. Przecinarka strunowa do cięcia wosków



Rys. 5.2.5. Stanowisko do nanoszenia siatek koordynacyjnych metodą sitodruku



Rys. 5.2.6. Forma wraz odlanymi płytami materiału modelowego na próbki do modelowania procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Technologia przygotowania niemetalicznych, miękkich materiałów modelowych na bazie plasteliny oraz syntetycznego wosku filii złożona była z następujących zabiegów:

- Ustalenie składu i odważenie poszczególnych składników.
- Topienie filii lub plasteliny w suszarce przy temperaturze $140 \div 180$ °C, a następnie dodanie pozostałych składników i wygrzanie otrzymanej mieszaniny przez 1 h.
- Szybkie zalanie całej kompozycji do stalowej formy o średnicy wewnętrznej $d = 60$ mm i wysokości $h = 300$ mm pokrytej od wewnątrz środkiem rozdzialającym (WD40 lub wazeliną).

Forma jest wstępnie podgrzana do temperatury około 150 °C i zamontowana na stole wibracyjnym (rys. 5.2.3).

- W celu uzyskania jednorodnej struktury formy przykryte są osłoną termoizolacyjną (styropianowo-metalową) oraz stół wibracyjny jest włączony przez 1 h.
- Zdjęcie osłony i demontaż formy po około 6 h i następnie włożenie jej do zamrażarki (temperatura –25 °C) na około 10 h, w celu ułatwić usunięcie materiału modelowego z formy.
- Po wyciągnięciu wlewka z formy materiał modelowy zostaje wytrzymany w temperaturze pokojowej przez 24 h, w celu osiągnięcia w całej jego objętości stałej temperatury, przy której przeprowadzone zostaną badania.
- Przeprowadzenie planowania i cięcia wlewka na próbki o odpowiednich wymiarach, na przecinarce strunowej (rys. 5.2.4).

W przypadku wykonywania próbek do badań w procesach modelowych na jedną z ich powierzchni nanoszono kwadratową siatkę koordynacyjną (o długości boku 2,5 mm), przy pomocy sitodruku (rys. 5.2.5).

Przedstawiona powyżej procedura przygotowania próbek z miękkich materiałów modelowych była każdorazowo ściśle przestrzegana, co miało na celu uniknięcie błędów opisanych w rozdz. 2.4.4. oraz uzyskanie powtarzalności wyników.

6. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW RZECZYWISTYCH

6.1. Wybór reprezentatywnych procesów oraz dobór materiałów rzeczywistych

We wcześniejszych rozdziałach przedstawiono podstawowe zalety i wady wykorzystania metod fizycznego modelowania do analizy i optymalizacji rzeczywistych procesów kształtowania plastycznego materiału. Wynika z nich, że fizyczne modelowanie przy użyciu miękkich materiałów modelowych może być zastosowane głównie do takich procesów, w których dominuje stan naprężeń ściskających, a zatem: kucie, spęczanie, walcowanie, wyciskanie, itp.

Ze względu na trudności, jak i na czasochłonność modelowania fizycznego szczególnie złożonych, przestrzennych struktur poszukuje się sposobów na upraszczanie modeli. Najczęściej stosowany jest podział złożonej, trójwymiarowej struktury na proste fragmenty, które można łatwo modelować oddzielnie.

Często przyjmuje się również, że znaczna część realizowanych w praktyce inżynierskiej procesów obróbki może być, bez popełnienia większego błędu, analizowana po założeniu uproszczonych stanów odkształcenia lub naprężenia, takich jak:

- płaski stan odkształcenia,
- osiowo-symetryczny stan odkształcenia,
- płaski stan naprężenia.

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój energooszczędnych technologii wytwarzających produkty o podwyższonej jakości. Obecnie panuje pogląd, że wyciskanie jest najbardziej ekonomiczną metodą pośród innych procesów obróbki plastycznej, przeznaczoną szczególnie do:

- ✓ wstępnej przeróbki plastycznej stali o niskiej plastyczności, których nie można odkształcać drogą kucia czy walcowania,
- ✓ wytwarzania prętów i wyrobów z otworami o złożonych kształtach, których otrzymanie innymi metodami jest trudne lub niemożliwe,
- ✓ łączenia różnorodnych metali i otrzymywania wyrobów wielowarstwowych o określonych grubościach poszczególnych warstw,
- ✓ wytwarzania małych partii wyrobów o dużej masie i prostych kształtach, których wytwarzanie innymi metodami jest nieekonomiczne.

Wyciskanie jest podstawową metodą wytwarzania rur, prętów i kształtowników oraz części maszyn ze stali, metali nieżelaznych. Wyroby wyciskane charakteryzują się dobrymi własnościami mechanicznymi, dużą dokładnością wymiarów, czystą i gładką powierzchnią. Przy czym wyciskanie, w zależności od temperatury obróbki wsadu można podzielić najczęściej na trzy przedziały temperaturowe: wyciskanie na zimno, ciepło i gorąco. Wyciskanie na gorąco znajduje zastosowanie do wytwarzania hutniczego półwyrobów i już od długiego czasu było przedmiotem badań wielu naukowców. Wyciskanie na ciepło i zimno zaczęto stosować później, w szczególności do wyciskania części maszyn i jest ono zbadane w znacznie mniejszym stopniu.

W tabeli 6.1.1 porównano zużycie materiałów wsadowych i energii dla różnych sposobów wytwarzania wyrobów, a w tabeli 6.1.2 przedstawiono dokładność wykonania wyrobów przy różnych wariantach obróbki metalu.

Tabela 6.1.1. Porównanie strat materiałów i zużycia energii dla różnych sposobów obróbki metali

Sposób obróbki	Uzysk [%]	Zużycie energii [J/kg · 10 ⁶]
Skrawanie	40-50	80-100
Wyciskanie na gorąco	75-80	53-56
Wyciskanie na ciepło	85	48
Wyciskanie na zimno	85	48

Tabela 6.1.2. Dokładność wykonania wyrobów różnymi sposobami obróbki metali

Sposób obróbki	Osiągalna dokładność średnicy (klasa)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Szlifowanie	X	X	X	X	X							
Toczenie		X	X	X	X	X						
Wyciskanie na zimno			X	X	X	X	X	X				
Wyciskanie na ciepło				X	X	X	X	X	X			
Wyciskanie na gorąco							X	X	X	X	X	X

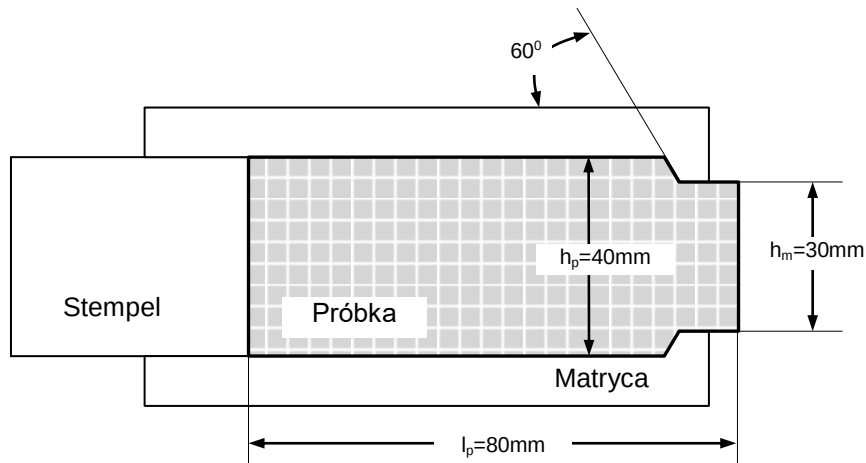
Z danych zamieszczonych w tabelach 6.1.1 wynika, że zużycie energii przy procentowym uzysku materiału przemawia zdecydowanie na korzyść procesów wyciskania. Ponadto w niektórych przypadkach dokładność wyciskania na ciepło i zimno może być podobna jak w procesach szlifowania i skrawania.

Przedstawione zalety wyciskania spowodowały, że weryfikację nowego opisu warunku podobieństwa plastycznego zdecydowano się przeprowadzić głównie dla procesów wyciskania.

Do badań wybrano następujące rodzaje wyciskania:

Proces nr 1

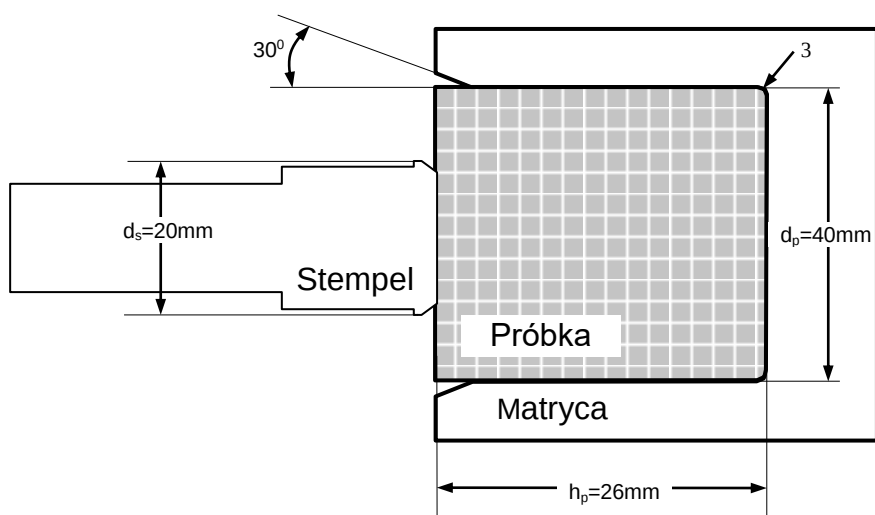
Wyciskanie współbieżne w płaskim stanie odkształcenia (rys. 6.1.3)



Rys. 6.1.3. Wyciskanie współbieżne w płaskim stanie odkształcenia: l_p – długość początkowa próbki, h_p – szerokość próbki, h_m – szerokość matrycy, α – kąt matrycy

Proces nr 2

Wyciskanie przeciwbieżne w osiowosymetrycznym stanie odkształcenia (rys. 6.1.2)



Rys. 6.1.4. Schemat osiowosymetrycznego wyciskania przeciwbieżnego: d_p – średnica próbki, h_p – wysokość próbki, d_s – średnica stempla

W celu zapewnienia izotermicznych warunków odkształcania oraz trwałości siatek koordynacyjnych nanoszonych na odkształcany materiał rzeczywiste procesy przeprowadzano przy temperaturze 22°C . Do badań wybrano trzy materiały rzeczywiste: ołów o czystości

99,9 % oraz aluminium wyżarzone o czystości 99,99 % oraz aluminium wstępnie umocnione o czystości 99,99 %, które przy temperaturze otoczenia posiadają krzywe umocnienia, o różnym charakterze. Naprężenie uplastyczniające ołowiu w temperaturze otoczenia po osiągnięciu maksymalnej wartości ulega obniżeniu, co jest charakterystyczne dla warunków obróbki plastycznej na gorąco. Natomiast dla aluminium wyżarzonego, naprężenie uplastyczniające w całym zakresie odkształceń bardzo intensywnie rośnie. W przypadku aluminium umocnionego uzyskano krzywą umocnienia o niewielkim stopniu umocnienia.

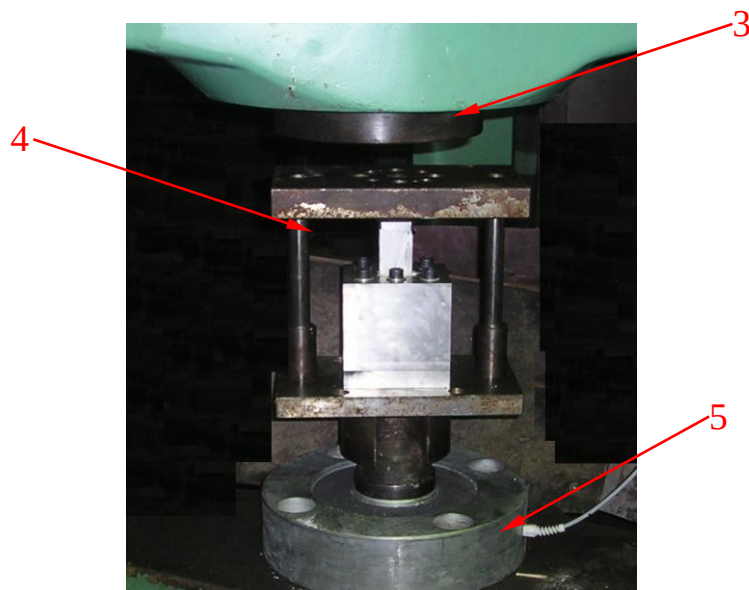
Proces nr 1

Do realizacji procesu nr 1 zaprojektowano i wykonano specjalne narzędzia przedstawione na rys. 6.1.5a. Na rys. 6.1.5b przedstawiono narzędzia zamontowane na prasie hydraulicznej ZD 100 wraz z czujnikiem do pomiaru siły firmy ZEPWN o zakresie 0÷1000 kN.

a)



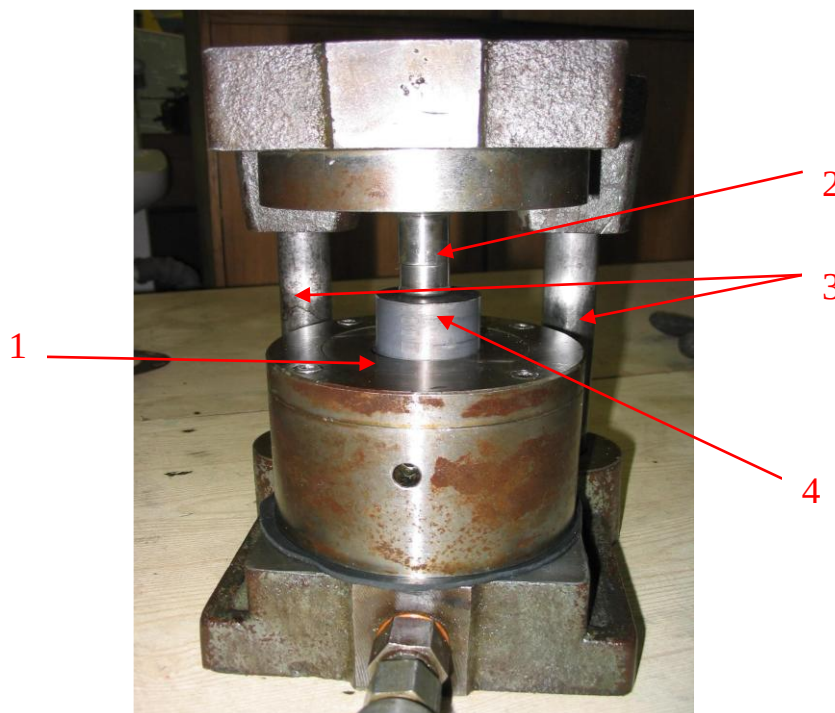
b)



Rys. 6.1.5. a) Narzędzia do procesu wyciskania w płaskim stanie odkształcenia: 1 – recypient, 2 – stempel oraz b) stanowisko badawcze: 3 – prasa, 4 – obudowa narzędzi, 5 – czujnik siły

Proces nr 2

Do realizacji procesu nr 2 wykorzystano specjalne urządzenie z wypychaczem (rys. 6.1.6). Urządzenie to składa się z matrycy (1), która jest połączona z hydraulicznym wypychaczem umożliwiającym wyjęcie próbki (4) po odkształceniu. W celu zapewnienia współosiowości stempla (2) z otworem matrycy zastosowano prowadzenie na słupach (3).



Rys. 6.1.6. Tłocznik do wyciskania przeciwbieżnego ołowiu: 1 – matryca, 2 – stempel, 3 – słupy prowadzące, 4 – odkształcana próbka

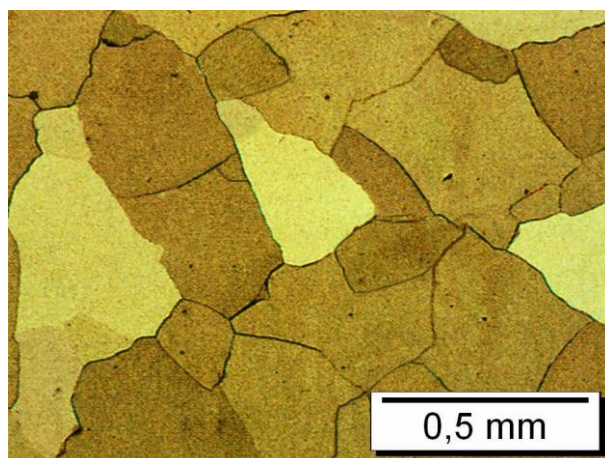
W procesie jest możliwość stosowania następujących stempli: półkulistego oraz płaskiego o przekroju kwadratowym lub okrągłym. Do badań używano głównie stempel okrągły o średnicy $d = 20 \text{ mm}$, długości części roboczej $h = 12 \text{ mm}$ i sfazowaniu $1-45^\circ$. Proces wyciskania przeciwbieżnego materiału rzeczywistego przeprowadzono na prasie TIRATEST 2300.

6.2. Wyznaczenie charakterystyk wybranych materiałów rzeczywistych

Spełnienie warunku podobieństwa w zakresie plastycznym wymaga w pierwszej kolejności wyznaczenie krzywych umocnienia materiału rzeczywistego. W pracy jako materiały rzeczywiste zastosowano: ołów o czystości 99,9 %, aluminium wyżarzone oraz aluminium umocnione o czystości 99,99 %. Krzywe umocnienia dla tych materiałów wyznaczono w plastometrycznej próbie ściskania.

OŁÓW

Materiał na próbki został odlany do formy o średnicy 60 mm i długości 150 mm, uzyskany odlew został przekuty ze zgniotem około 40 %, po czym poddano go wyżarzaniu rekrytalizującemu przez 30 min w temperaturze $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a następnie studzono go na powietrzu. Na rys 6.2.1 przedstawiono strukturę ołowiu po tych operacjach. Z tak przygotowanego materiału wykonano próbki o wysokości 20 mm i średnicy 20 mm (rys. 6.2.2a). Próby ściskania przeprowadzane były przy temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej Instron 3369 (rys. 6.2.2b).



Rys. 6.2.1. Struktura ołowiu po wstępnej obróbce cieplno-mechanicznej



Rys. 6.2.2. a) Zdjęcie stanowiska do realizacji próby ściskania oraz b) zestaw próbek

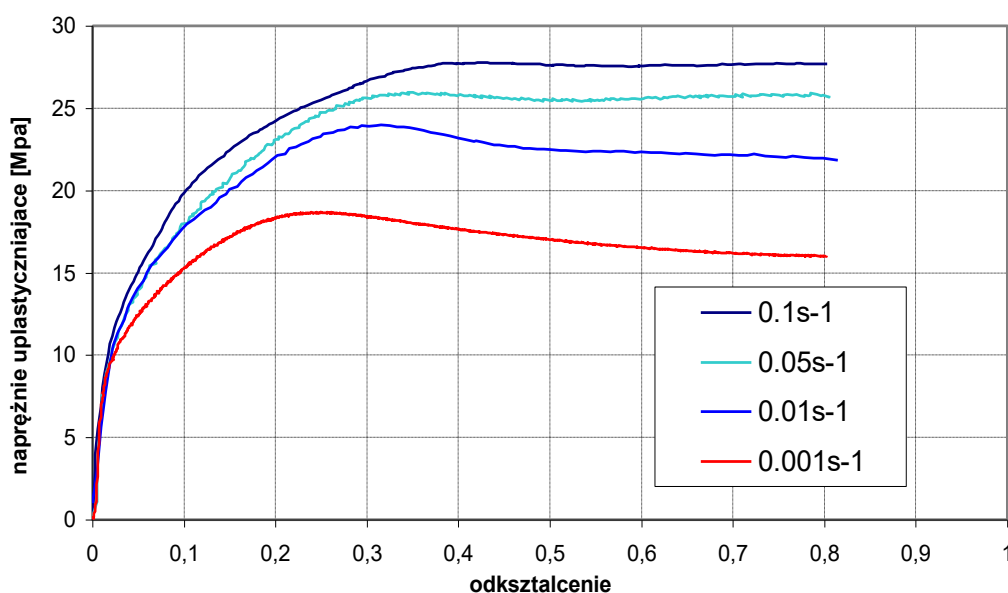
W celu minimalizacji współczynnika tarcia powierzchnie czołowe próbek oraz kowadeł smarowano olejem maszynowym. Rejestrowane w trakcie prób wartości siły ściskającej w funkcji zmiany wysokości próbki przeliczano na naprężenie uplastyczniające σ_{upl} i odkształcenie plastyczne ε_p zgodnie z zależnościami:

$$\sigma_{upl} = \frac{4P}{\pi d^2}, \quad (6.2.1)$$

$$\varepsilon_p = \ln \frac{h}{h_0}, \quad (6.2.2)$$

gdzie: P – siła ściskająca,
 d – średnica odkształconej próbki,
 h_0 – wysokość początkowa próbki,
 h – wysokość końcowa próbki.

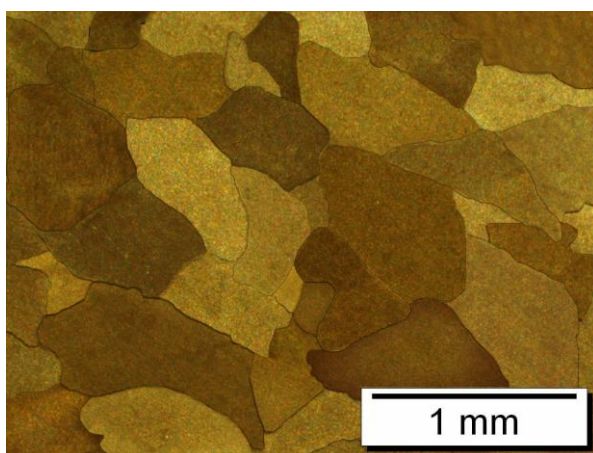
Dla wszystkich prędkości odkształcania otrzymano przebiegi naprężenie uplastyczniające – odkształcenie plastyczne, w których naprężenie uplastyczniające po szybkim osiągnięciu wartości maksymalnej obniża się, a następnie ustala się na stałym poziomie aż do zniszczenia materiału (rys. 6.2.3). Zgodnie z literaturą przebiegi takie świadczą, że w materiale wystąpił proces rekrytalizacji dynamicznej. Temperatura otoczenia dla ołowiu jest więc temperaturą obróbki plastycznej na gorąco. Wraz ze wzrostem prędkości odkształcania następuje wzrost wartości odkształcenia krytycznego od 0,26 dla prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$ do 0,4 dla prędkości $\dot{\varepsilon} = 0,05 \text{ s}^{-1}$ oraz wzrost maksymalnego naprężenia uplastyczniającego od 18 MPa do 27,5 MPa.



Rys. 6.2.3. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego ołowiu dla różnych prędkości odkształcania

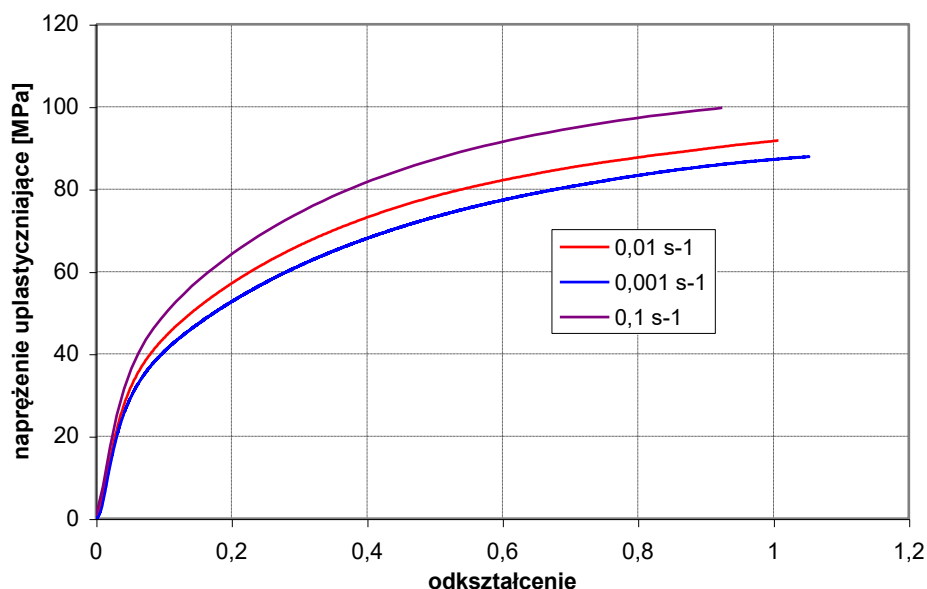
ALUMINIUM WYŻARZONE

Materiał na próbki pobrany został z gąski odlewniczej i przekuty ze zgniotem około 30 %. Z tak przygotowanego materiału wykonano próbki, które następnie poddano wyżarzaniu rekrytalizującemu przez 20 min w temperaturze $500^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ a następnie studzono je na powietrzu. Na rys. 6.2.4 przedstawiono strukturę aluminium wyżarzonego po takiej obróbce cieplno-mechanicznej.



Rys. 6.2.4. Struktura aluminium wyżarzonego po wstępnej obróbce cieplno-mechanicznej

Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie plastyczne dla aluminium wyżarzonego tak jak dla ołowiu zostały wyznaczone przy temperaturze otoczenia w plastometrycznej próbie ściskania próbek o wysokości 15 mm i średnicy 15 mm, korzystając z zależności (6.2.1) i (6.2.2). Jako środek smarujący zastosowano roztwór stearynianu magnezu z denaturatem. Uzyskane uśrednione przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla aluminium wyżarzonego przedstawiono na rys. 6.2.5.

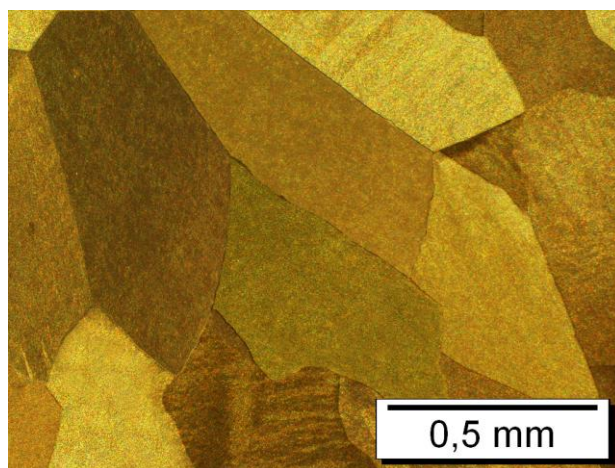


Rys. 6.2.5. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla aluminium wyżarzonego dla różnych prędkości odkształcenia

Naprężenie uplastyczniające aluminium wyżarzonego w całym zakresie odkształceń rośnie, co jest typowe dla warunków obróbki plastycznej na zimno. Badany materiał wykazuje bardzo silne umocnienie odkształceniowe oraz średnią czułość na prędkość odkształcania, przy czym jest ona znacznie mniejsza od czułości ołowiu odkształcanego w identycznych warunkach.

ALUMINIUM UMOCNIONE

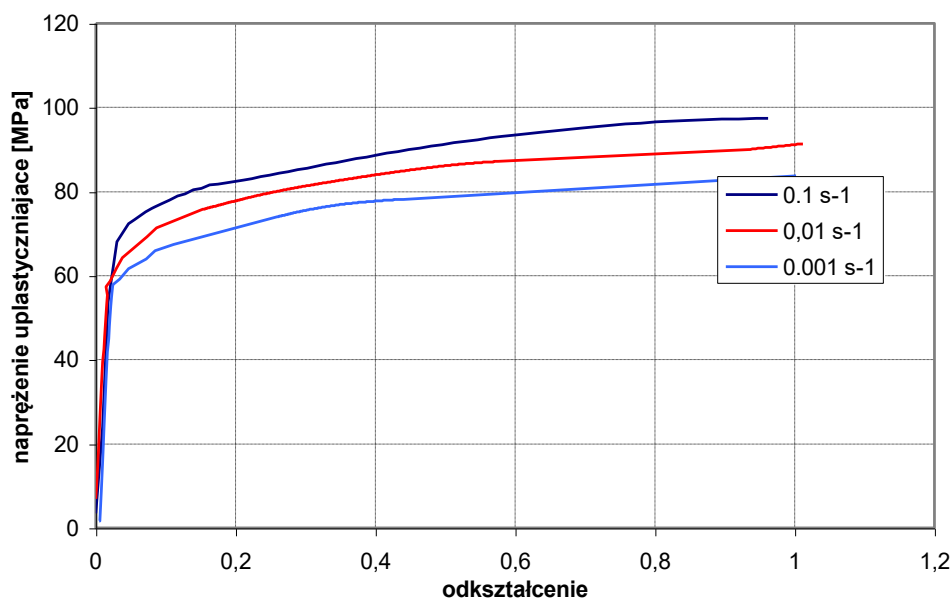
Materiał na próbki pobrany z gąski odlewniczej został przekuty ze zgniotem około 30 %, po czym poddano go wyżarzaniu rekrytalizującemu przez 25 min w temperaturze $500^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ a następnie studzono go na powietrzu. Następnie ponownie został on odkształcony ze zgniotem 25 %. Struktura tego materiału charakteryzuje się większym ziarnem i teksturą odkształcenia w porównaniu do aluminium wyżarzonego (rys. 6.2.6).



Rys. 6.2.6. Struktura aluminium umocnionego po wstępnej obróbce cieplno-mechanicznej

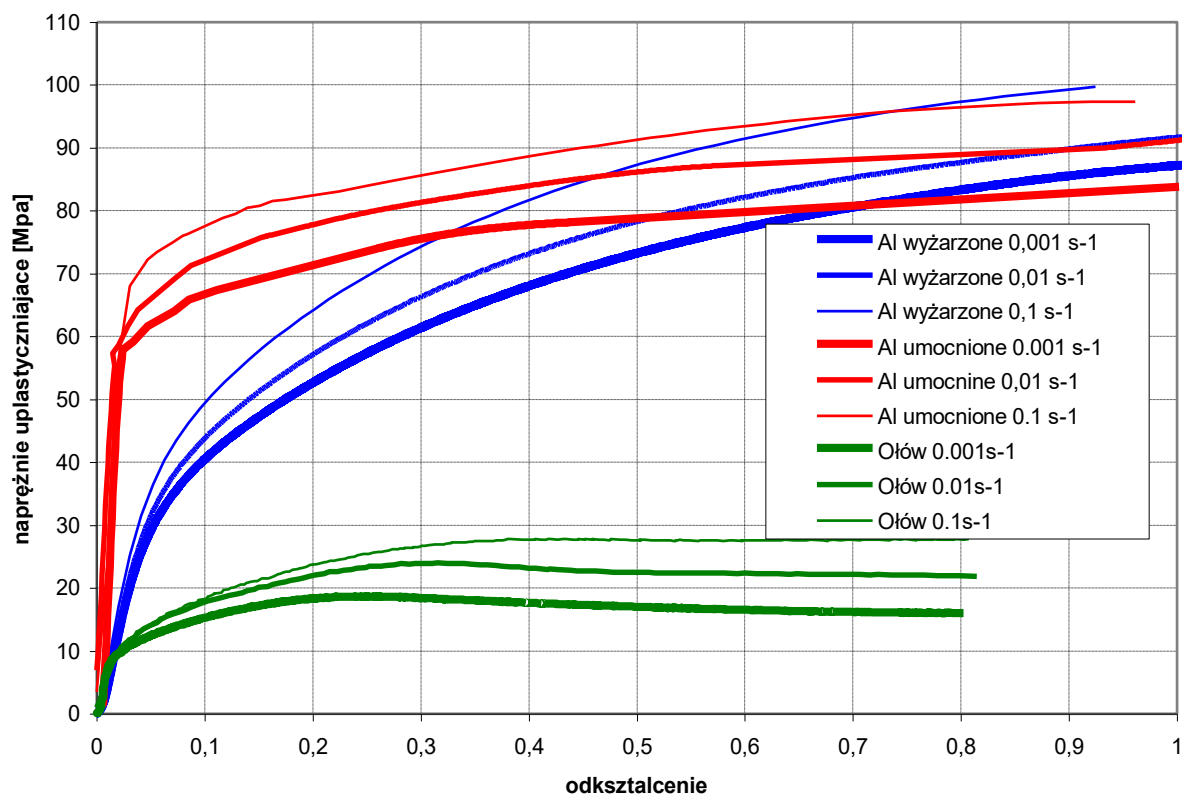
Z tak przygotowanego materiału wykonano próbki o wysokości 15 mm i średnicy 15 mm, których oś była prostopadła do osi działania siły podczas ostatniego zgniotu. Jako środek smarujący w próbie spęczania zastosowano roztwór stearynianu magnezu z denaturatem. Uzyskane przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia rzeczywistego wyznaczone za pomocą równań (6.2.1) i (6.2.2) dla aluminium umocnionego przedstawiono na rys. 6.2.7.

Dzięki zastosowaniu odpowiedniej obróbki cieplno – mechanicznej uzyskano materiał wstępnie umocniony o mniejszym umocnieniu odkształceniowym niż aluminium wyżarzone.



Rys. 6.2.7. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla aluminium umocnionego dla różnych prędkości odkształcenia

Na rys. 6.2.8 zestawiono przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla wszystkich materiałów rzeczywistych. Wybrane materiały do badań przy temperaturze otoczenia posiadają krzywe umocnienia o różnym charakterze odpowiadające zarówno warunkom obróbki plastycznej na zimno (aluminium) jak i na gorąco (ołów).



Rys. 6.2.8. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla ołowiu oraz aluminium wyżarzonego i umocnionego dla różnych prędkości odkształcenia

W próbie spęczania dla wszystkich materiałów zaobserwowano tworzenie się bardzo niewielkiej zewnętrznej sferyczności powierzchni bocznej próbki – beczkowatości. Potwierdza to, że wartość współczynnika tarcia dla zastosowanych środków smarujących w przeprowadzonych badaniach była bardzo mała. Analiza metodą invers przedstawiona w rozdziale 6.4 wykazała, że przy tak małej beczkowatości bez popełniania większych błędów można było przyjąć jednorodny stan odkształcenia w spęczanych próbkach, a naprężenie i odkształcenie wyznaczyć z równań (6.2.1) i (6.2.2)

Oba rodzaje aluminium wykazują zbliżoną czułość na prędkość odkształcania. Ołów natomiast jest materiałem bardziej czułym na zmiany prędkości odkształcania (tab. 6.2.1). Współczynnik czułości na prędkość odkształcania dla badanych materiałów umieszczone w tab. 6.2.1 wyznaczono ze wzoru

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(\sigma_i(\dot{\epsilon}_1) / \sigma_i(\dot{\epsilon}_2))}{\ln(\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2)}, \quad (6.2.3)$$

gdzie: i – liczba punktów pomiarowych dla których wyznaczano poszczególne współczynniki czułości na prędkość odkształcania, w pracy przyjęto pięć takich punktów, wartość odkształcenia dla tych punktów wyznaczano dzieląc całkowite odkształcenia na pięć równych zakresów,

$\sigma_i(\dot{\epsilon}_1)$, $\sigma_i(\dot{\epsilon}_2)$ – wartości naprężeń odczytane z krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie plastyczne dla prędkości odkształcania $\dot{\epsilon}_1$ i $\dot{\epsilon}_2$ i odpowiednich wartości odkształceń plastycznych.

Tabela 6.2.1. Wartości współczynników czułości na prędkość odkształcania dla materiałów rzeczywistych

Materiał	Współczynnik czułości na prędkość odkształcania $m_{0,1-0,001}$
Ołów	0,09
Aluminium wyżarzone	0,037
Aluminium umocnione	0,033

Do badań strukturalnych zastosowano mikroskop optyczny firmy Olympus GX 51 z kamerą cyfrową Olympus DO 12. Obraz strukturalny był zapisywany za pomocą specjalnego przetwornika cyfrowo-analogowego na komputerze PC. Próbki do badań wykonane z ołowiu trawiono w kwasie azotowym (1,4) przez okres około 3 minut. Natomiast aluminiowe próbki trawiono w rozcieńczonym wodą odczynniku Tickera przez około 1,5 minuty.

6.3. Wyznaczenie współczynnika tarcia

Jednym z podstawowych warunków podobieństwa pomiędzy materiałem modelowym a rzeczywistym jest warunek podobieństwa tarcia. Niezbędne, więc było dobranie odpowiednich środków smarujących, które zapewniłyby w procesie rzeczywistym i modelowym podobne współczynniki tarcia. Wstępne badania prowadzone przez autora wykazały, że dla materiałów modelowych najłatwiej uzyskać współczynnik tarcia na poziomie 0,05 przy zastosowaniu wazeliny jako środka smarującego.

Dla materiałów rzeczywistych i modelowych przyjęto model tarcia Coulomba a do wyznaczenia wielkości tarcia wybrano próbę pierścieniową, najprostszą i najpowszechniej stosowaną, zapewniającą przy tym dobrą zgodność i powtarzalność wyników. Ponadto założono, że współczynnik tarcia zależy jedynie od środka smarnego. Uzasadnienie wyboru próby pierścieniowej zostało również wyjaśnione w rozdziale 2.5. W próbie pierścieniowej próbki były odkształcane za pomocą kowadeł o chropowatości R_a 0,32, taką samą chropowatość miały narzędzia stosowane w rzeczywistych procesach wyciskania.

W próbie pierścieniowej zastosowano próbki o następujących wymiarach: wysokość 12 mm, średnica wewnętrzna 20 mm oraz średnica zewnętrzna 40 mm. Badania przeprowadzono dla próbek bez środka smarnego oraz dla następujących środków smarujących: olej, teflon + grafit, stearynian magnezu z denaturatem. Na podstawie zmiany wymiarów średnicy wewnętrznej oraz redukcji wysokości pierścienia po odkształceniu określono wartości współczynników tarcia z wykresu przedstawionego na rys. 2.5.1.5. Dla każdego smaru i materiału rzeczywistego przeprowadzono 5 prób.

OŁÓW

Najmniejszy współczynnik tarcia uzyskano dla teflonu i grafitu – $\mu = 0,02$, nieznacznie większy otrzymano dla oleju maszynowego – $\mu = 0,055$, natomiast w przypadku tarcia suchego wynosił on 0,14 (tab. 6.3.1).

Tabela. 6.3.1. Wyniki badań współczynnika tarcia dla ołowiu

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100 %	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100 %	μ
bez smaru	20,1	18,2	9,4	11,5	8	30	0,14
teflon + grafit	20,05	22,1	10	11,5	8	30	0,02
olej maszynowy	20,1	20,4	-1,5	11,5	8	30	0,055
stearynian magnezu	20,1	19,65	2,2	11,5	8	30	0,07

Jak wynika z podanych wartości liczbowych współczynnik tarcia ołowiu ma relatywnie niskie wartości. Ostatecznie w eksperymencie wyciskania przeciwbieżnego zastosowany został

olej maszynowy, gdyż dla tego środka smarującego uzyskano współczynnik tarcia najbardziej zbliżony do współczynnika tarcia materiałów modelowych

ALUMINIUM

Podczas odkształcania aluminium (umocnionego i wyżarzonego) występuje duży problem związany z jego przywieraniem do powierzchni narzędzi. Współczynniki tarcia uzyskane w próbie pierścieniowej dla różnych środków smarujących przedstawiono w tabelach 6.3.2 i 6.3.3. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że najlepszym środkiem smarującym jest teflon + grafit. W próbie pierścieniowej dla takich warunków smarowania uzyskano bardzo niską wartość współczynnika tarcia wynoszącą 0,03.

Jednakże, aby uzyskać podobną wartość współczynnika tarcia, jak dla materiałów modelowych, oraz ze względu na trudności użycia w rzeczywistym procesie teflonu z grafitem, w procesach tych zdecydowano zastosować zawiesinę stearynianu magnezu w denaturacie, dla której uzyskano współczynnik tarcia najbardziej zbliżony do współczynnika tarcia materiałów modelowych i wynoszący 0,05.

Tabela. 6.3.2. Wyniki badań współczynnika tarcia dla aluminium umocnionego

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100 %	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100 %	μ
bez smaru	20,05	17,6	12,2	11,5	8	30	0,2
teflon + grafit	20,1	21,4	-6,4	11,5	8	30	0,03
olej maszynowy	20,1	19,5	3	11,5	8	30	0,06
stearynian magnezu	20,1	20,3	-1,2	11,5	8	30	0,05

Tabela. 6.3.3. Wyniki badań współczynnika tarcia dla aluminium wyżarzonego

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100 %	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100 %	μ
bez smaru	20,1	17,75	11,7	11,5	8	30	0,2
teflon + grafit	20,05	21,4	-6,7	11,5	8	30	0,03
olej maszynowy	20,05	19,4	3,2	11,5	8	30	0,06
stearynian magnezu	20,1	20,35	-1,2	11,5	8	30	0,05

gdzie:

D_p – średnica wewnętrzna początkowa,

D_k – średnica wewnętrzna końcowa,

H_p – wysokość początkowa,

H_k – wysokość końcowa,

$\Delta D = (D_p - D_k)$

$\Delta H = (H_p - H_k)$,

μ - współczynnik tarcia odczytany z wykresu na rys 2.5.1.5.

Zdjęcia odkształconych próbek stosowanych w badaniach w próbie pierścieniowej dla poszczególnych materiałów przedstawiono na rys. 6.3.1.



Rys. 6.3.1. Zdjęcia odkształconych próbek w próbie pierścieniowej: a) ołów, b) aluminium umocnione i c) aluminium wyżarzone

6.4. Zastosowanie metody invers do sprawdzenia poprawności wyznaczania krzywych umocnienia

Krzywe płynięcia materiału wyznaczone są najczęściej w oparciu o wyniki doświadczalne uzyskane z prób plastometrycznych. W doświadczeniach tych występuje szereg zaburzeń, m.in.: niejednorodność pola odkształceń, lokalizacja odkształcenia, liniowość i nieliniowość tarcia, czy też wzrost temperatury w wyniku zamiany pracy odkształcenia plastycznego i tarcia na ciepło. Mogą one znacznie utrudniać analizę uzyskanych rezultatów [136, 138].

Z tego też powodu dążeniem wielu badaczy było opracowanie i rozwój metody, która uwzględniałaby i eliminowała wspomniane zakłócenia występujące w próbach plastometrycznych oraz pozwoliłaby na dokładne oszacowanie parametrów reologicznych i tarcia niezależnie od tych zjawisk [138].

Okazuje się, że problem oceny parametrów reologicznych oraz mechanicznych i cieplnych warunków brzegowych może zostać zdefiniowany jako problem odwrotny. Algorytm pozwalający go rozwiązać został nazwany **metodą invers**.

Rozwiązywanie tego typu zadań stało się niezwykle istotne, odkąd zaczęto uwzględniać oddziaływanie tarcia podczas identyfikacji parametrów reologicznych odkształcanego materiału. Właściwa ocena współczynnika (czynnika) tarcia jest niezbędna dla dokładnej symulacji płynięcia materiału w warunkach laboratoryjnych a przede wszystkim w przemysłowych procesach kształtowania materiału.

W niniejszej pracy metodę odwrotną wykorzystano w celu sprawdzenia poprawności przebiegów naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla materiałów użytych w badaniach eksperymentalnych, wyznaczanych w sposób analityczny przy założeniu idealnych warunków tribologicznych.

Ze względu na ograniczony dostęp do metody invers, próby takie przeprowadzono jedynie dla jednego materiału rzeczywistego – aluminium wyżarzonego oraz jednego materiału modelowego – wosku filia.

Przyjęto założenie, że jeżeli krzywe umocnienia wyznaczone z pomiarów w sposób analityczny dla w/w materiałów pokryją się z przebiegami krzywych wyznaczonymi metodą odwrotną dla odpowiednich materiałów, wówczas można przyjąć, że przebiegi naprężenia dla pozostałych materiałów rzeczywistych i modelowych wyznaczone analitycznie są poprawnymi przebiegami rzeczywistymi, tożsamymi uzyskanymi z metody invers.

6.4.1. Model analizy odwrotnej

Podstawowym celem analizy odwrotnej jest wyznaczenie parametrów modelu reologicznego odkształcanego materiału oraz modelu warunków brzegowych na podstawie wyników uzyskanych z prób plastometrycznych.

Bez względu na typ zagadnienia odwrotnego, przyjętej próby plastometrycznej i niezależnie od stosowanej metody rozwiązania, algorytm metody odwrotnej składa się z trzech części:

1. **Eksperyment:** Zmierzone dane z eksperymentu (dla jednej z przyjętych prób plastometrycznych) są informacją wejściową dla przyjętej funkcji celu algorytmu odwrotnego.
2. **Symulacja:** Bezpośredni problem, który jest symulacją wybranej próby plastometrycznej, polegający na określeniu termo – mechanicznego zagadnienia rozwiązywanego zwykle metodą elementów skończonych.
3. **Optymalizacja:** Minimalizacja zdefiniowanej funkcji celu. Mogą zostać zastosowane klasyczne bezgradientowe i gradientowe metody, jak również algorytmy genetyczne i sieci neuronowe poszukujące minimum funkcji celu [45].

Połączenie rozwiązania zadania bezpośredniego opartego o MES wraz z technikami optymalizacyjnymi w obliczeniach odwrotnych daje efektywne narzędzie, które pozwala na analizę wyników uzyskanych z prób plastometrycznych przy uwzględnieniu wspomnianych powyżej zaburzeń. Szybkość procesu identyfikacji poszukiwanych parametrów zależy w znacznym stopniu od algorytmu optymalizacyjnego. Metoda ta zwana *analizą odwrotną* została sprawdzona i potwierdzona dla różnych materiałów i warunków odkształcenia. Przetestowane zostały w niej również różne reologiczne modele odkształcanego materiału i modele warunków brzegowych (mechanicznych i termicznych) [136].

Analizę odwrotną przeprowadzono, dzięki uprzejmości prof. M. Pietrzyka z AGH w Krakowie na opracowanym przez niego programem Comp_axi [101]. Szczegóły rozwiązania można znaleźć w pozycji [81], natomiast główne założenia i równania przedstawiono poniżej.

W metodzie invers model naprężenia uplastyczniającego i współczynnik tarcia identyfikowane są przez poszukiwanie **minimum funkcji celu**, która jest zdefiniowana jako błąd średniokwadratowy między zmierzonymi i obliczonymi obciążeniami i kształtem próbek. Forma przyjętej funkcji celu, zwanej *funkcjonałem błędu* zależy od typu estymowanych parametrów i rodzaju przeprowadzonego eksperymentu. W zastosowanej analizie przyjęto następującą postać funkcjonału błędu:

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{N_{pt}} \sum_{i=1}^{N_{pt}} \left[\frac{1}{N_{ps}} \sum_{j=1}^{N_{ps}} \left(\frac{F_{cji}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_i) - F_{mji}}{F_{mji}} \right)^2 + \left(\frac{\beta_{ci}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_i) - \beta_{mi}}{\beta_{mi}} \right)^2 \right]}, \quad (6.4.1.1)$$

gdzie: F_{mij} , F_{cij} – wartości sił: zmierzone i obliczone, β_{mi} , β_{ci} – beczkowatość próbki zmierzona i obliczona po spęczeniu, N_{pt} – liczba testów, N_{ps} – liczba sił zarejestrowanych podczas każdej próby spęczania, $\mathbf{p}$ – wektor wartości wejściowych procesu (prędkość odkształcenia), $\mathbf{x}$ – wektor współczynników w modelu (parametry reologiczne, czynnik tarcia).

Przy czym beczkowatość próbki opisana jest zależnością:

$$\beta = 1 - \frac{V}{V_0}, \quad (6.4.1.2)$$

gdzie: V_0 – objętość początkowa próbki, $V = 0.25\pi D_k^2 H_k$ – objętość walca, którego podstawa jest powierzchnią kontaktu próbki z powierzchnią narzędzia o wysokości określonej na końcu próby spęczania, D_k – średnica próbki po spęczeniu na powierzchni kontaktu z narzędziem, $D_k = 0.5(D_G + D_D)$

Minimalizacja powyższego funkcjonału błędu dokonana została ze względu na parametry reologiczne i czynnik tarcia przy użyciu odpowiednich metod optymalizacyjnych [45].

Założono, że rozważany ośrodek jest ciągły o objętości V , którego powierzchnia złożona jest z dwóch części: powierzchni tarcia S_T oraz powierzchni swobodnej S_O . Modelowany ośrodek jest materiałem sztywno-plastycznym spełniającym warunek plastycznego płynięcia Hubera-Missesa. Ponadto w objętości V pomijany jest wpływ sił ciężkości i sił bezwładności. Z powodu operowania mocą odkształcenia plastycznego zależność sił tarcia od prędkości metalu powoduje, że muszą one być różniczkowalne w trakcie minimalizacji funkcjonału mocy i wyrażone w postaci mocy sił tarcia. Dla powyższych założeń funkcjonal mocy przyjmie wartość minimalną dla pola prędkości będącego rzeczywistym rozwiązaniem zadania oraz spełniającym warunki nieściśliwości i kinetycznych warunków brzegowych na powierzchni S_T . Wobec powyższych funkcjonal mocy może przyjąć następującą postać:

$$J = \int_V (\sigma_i \dot{\epsilon}_i + \lambda \dot{\epsilon}_V) dV - \int_{S_t} \underline{\sigma}^T \underline{v} dS_t, \quad (6.4.1.3)$$

gdzie: λ - mnożnik Lagrange'a, σ_i – intensywność naprężenia, która zgodnie z hipotezą Hubera-Misses'a spełnia warunek plastyczności σ_p , $\dot{\epsilon}_i$ - intensywność prędkości odkształcenia, $\dot{\epsilon}_V = 0$ – objętościowa prędkość odkształcenia, $\{\tau_x, \tau_y\}^T$ – wektor granicznego przyłożenia, $\underline{v} = \{v_x, v_y\}^T$ – wektor prędkości, v_x, v_y – składowe wektora prędkości, τ_x, τ_y - składowe zewnętrznego naprężenia, które w procesach kształtowania plastycznego metalu jest naprężeniem tarcia albo naprężeniem wywołanym przez zewnętrzne naprężenie.

Warunek nieściśliwości jest nakładany na pole prędkości przez wprowadzenie do funkcjonału mocy zmiany objętości metodą mnożnika Lagrange'a. Wówczas $\underline{c}$ jest odpowiednim wektorem, takim, że zależność $\dot{\epsilon}_V = \underline{c}^T \underline{\dot{\epsilon}}$, stanowi warunek nieściśliwości. Zależność między składowymi dewiatora tensora naprężenia oraz wektorem prędkości odkształcenia jest przyjmowana zgodnie z prawem Levy-Misesa:

$$\underline{\sigma} = \frac{\sigma_p}{3\dot{\epsilon}_i} \underline{\dot{\epsilon}}, \quad (6.4.1.4)$$

Po dyskretyzowaniu, a następnie po zrózniczkowaniu funkcjonału mocy względem składowych prędkości w węzłach oraz względem mnożnika Lagrange'a, otrzymuje się układ nieliniowych równań. W wyniku linearyzacji metodą Newtona-Rapsona powstaje następujący układ równań liniowych:

$$\underline{p} = \underline{K} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{v} \\ \lambda \end{Bmatrix}, \quad (6.4.1.5)$$

gdzie:

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial \underline{\lambda}^T \partial \underline{\lambda}} & \underline{b} \\ \underline{b}^T & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{p} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial J}{\partial \underline{\lambda}^T} \\ \underline{b}^T \hat{\underline{v}} \end{Bmatrix}, \quad \underline{b} = \int_V \underline{B}^T \underline{c} dV, \quad (6.4.1.6)$$

$\hat{\underline{v}}$ - wektor prędkości węzłowych obliczony w poprzedniej iteracji, $\Delta \underline{v}$ – wektor przyrostów prędkości węzłowych, $\underline{c}$ – macierz, narzucająca warunek nieściśliwości, $\underline{B}$ – macierz pochodnych funkcji kształtu

Warunki brzegowe

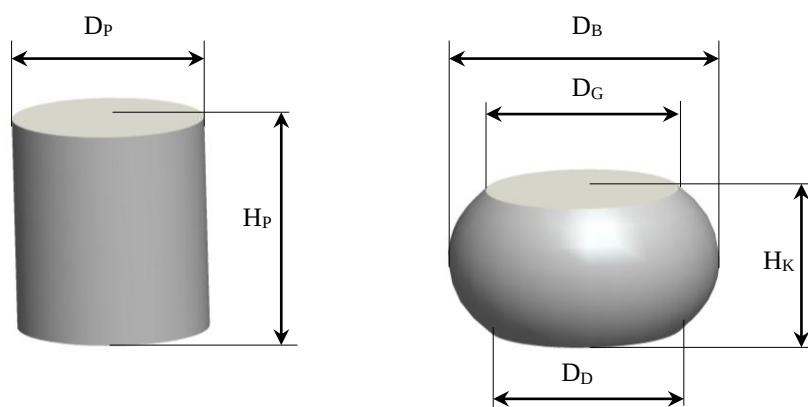
W omawianym rozwiązaniu w opisie warunków brzegowych, ze względu na możliwość przywierania materiału do stempla wykorzystano model tarcia zaproponowany przez Chen'a i Kobayashi'ego [29], opisany zależnością:

$$\tau = m \frac{\sigma_p}{\sqrt{3}} \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\underline{v}_s|}{a} \right) \right], \quad (6.4.1.7)$$

gdzie: m – czynnik tarcia, zależny od własności narzędzia, materiału i smaru, chropowatości stykających się powierzchni oraz temperatury, $\underline{v}_s$ – prędkość poślizgu materiału względem narzędzia, a – stała, kilka rzędów mniejsza od prędkości poślizgu (jeśli wartość prędkości poślizgu $\underline{v}_s$ jest równa a , to równanie (6.4.1.7) przyjmuje klasyczną formę modelu tarcia Treski $\tau = m \tau_{\max}$, $\tau_{\max}$ – granica plastyczności na ścinanie)

Eksperyment

W omawianym eksperymencie przeprowadzono próby spęczania walcowych próbek wykonanych z aluminium o wymiarach 15x15 mm, przy użyciu stearynianu magnezu, jako środka smarnego dla początkowej średniej wartości prędkości odkształcania: 0,01 i 0,1 s⁻¹ oraz stałej temperatury wynoszącej 22 °C (rys. 6.4.1.1). Podczas procesu rejestrowana była siła jako funkcja przemieszczenia narzędzia (jednej z ruchomych płyt). Uzyskane przebiegi były danymi wejściowymi dla modelu odwrotnego.



Rys. 6.4.1.1. Schemat próbek stosowanych w badaniach przed i po eksperymencie.

Porównanie i dyskusja wyników

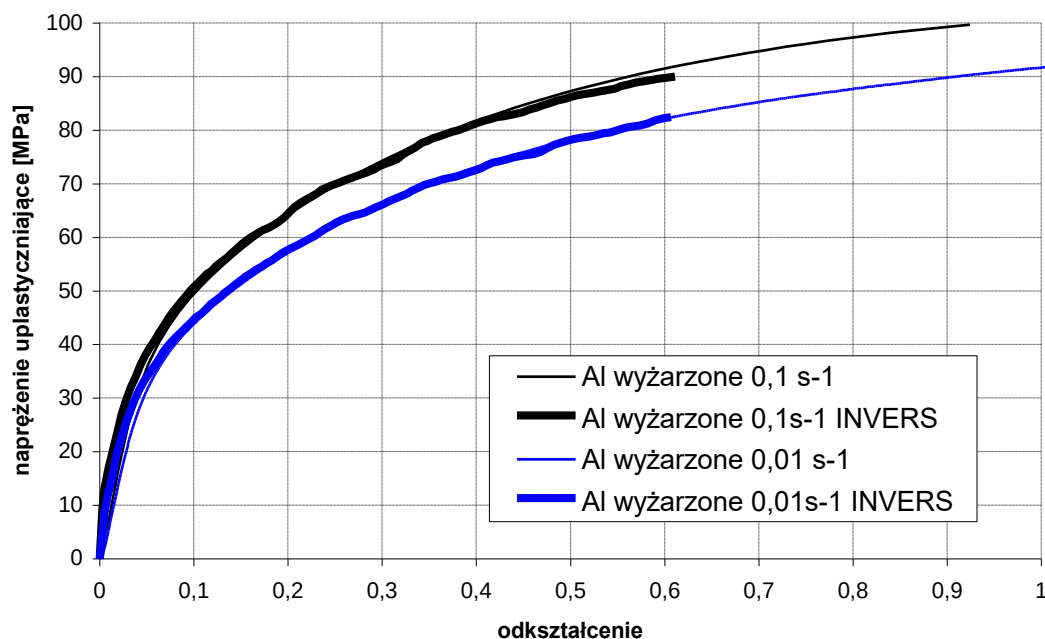
W tabeli 6.4.1.1 przedstawiono wartości beczkowatości próbek i wyznaczone przy użyciu metody invers wartości czynnika tarcia dla aluminium wyżarzzonego.

Tabela 6.4.1.1. Beczkowatość próbek i wartości czynnika tarcia wyznaczone metodą invers dla różnych prędkości odkształcania

Test	beczkowatość β	czynnik tarcia m
Al, $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$	0,0191	0,032
Al, $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$	0,0229	0,04

Wyznaczone metodą invers naprężenie uplastyczniające w funkcji odkształcenia uwzględnia wpływ tarcia, który bazuje na pomiarze beczkowatości próbki. Krzywe umocnienia uzyskane z metody odwrotnej wykazują bardzo dobrą zgodność w porównaniu do krzywych umocnienia wyznaczonych w sposób analityczny (rys. 6.4.1.1). Potwierdza to, że w badaniach eksperymentalnych panowało bardzo niskie tarcie, które w niewielkim stopniu

wpływało na kształt krzywej umocnienia. Wpływ ten jest widoczny jedynie dla większej prędkości odkształcenia $0,1 \text{ s}^{-1}$ dopiero przy odkształceniu większym od 0,4.



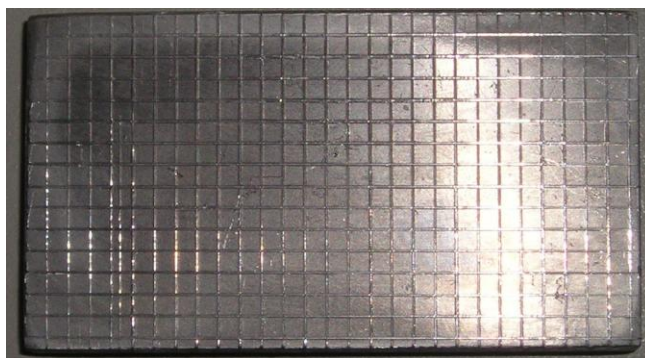
Rys. 6.4.1.1. Porównanie krzywych umocnienia aluminium wyżarzzonego wyznaczonych analitycznie oraz metodą invers.

Ponadto stwierdzono, że beczkowatość próbek nie jest wystarczająco wrażliwa na zmiany czynnika tarcia. Stąd wartości czynnika tarcia wyznaczone metodą invers na podstawie beczkowatości nie są miarodajne, jeżeli chodzi o warunki tribologiczne panujące podczas próby. Dlatego wartości współczynników tarcia zostały określone na podstawie próby spęczania pierścienia. Do dalszej analizy zostały przyjęte krzywe umocnienia wyznaczone metodą invers. Jednakże z powodu braku dużych różnic w przebiegach uzyskanych z analizy odwrotnej i eksperymentu zdecydowano się dla pozostałych materiałów tj.: aluminium umocnionego i ołowiu przyjąć krzywe umocnienia wyznaczone metodami konwencjonalnymi.

6.5. Omówienie wyników badań wybranych procesów rzeczywistych

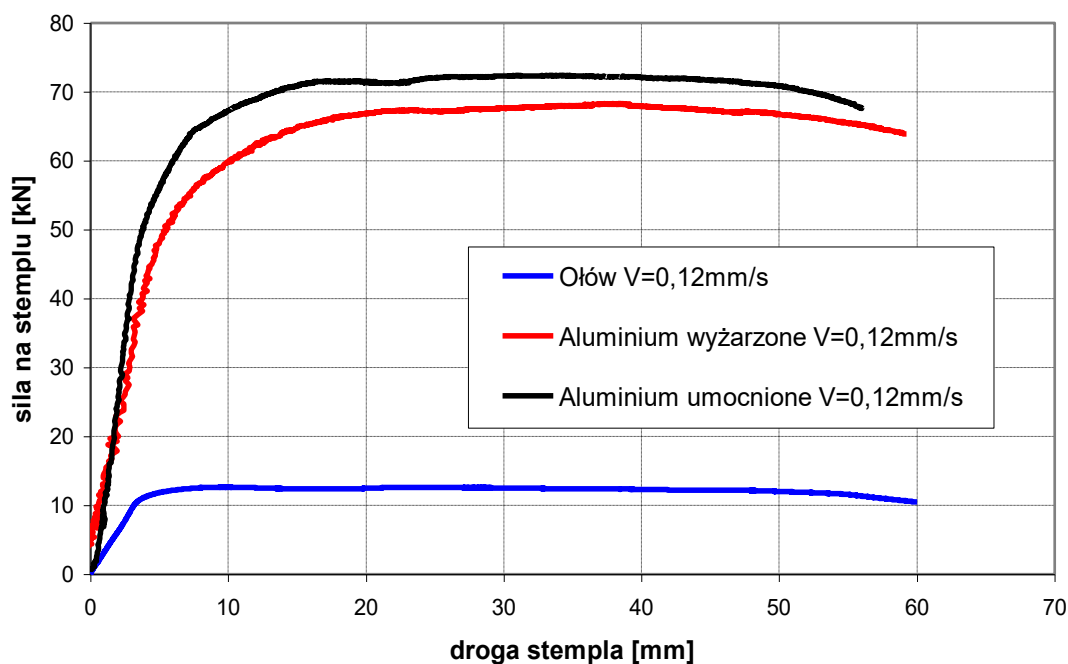
Proces nr 1

Rzeczywisty proces wyciskania przeciwbieżnego w płaskim stanie odkształcenia został przeprowadzony dla ołowiu, aluminium wyżarzonego i umocnionego. Materiałem wyjściowym były próbki złożone z dwóch prostopadłościanów o wymiarach 10x40x70 mm. Na powierzchni styku obu prostopadłościanów naniesiona była siatka koordynacyjna o boku 2,5 mm, która służyła do wyznaczania rozkładu odkształceń.



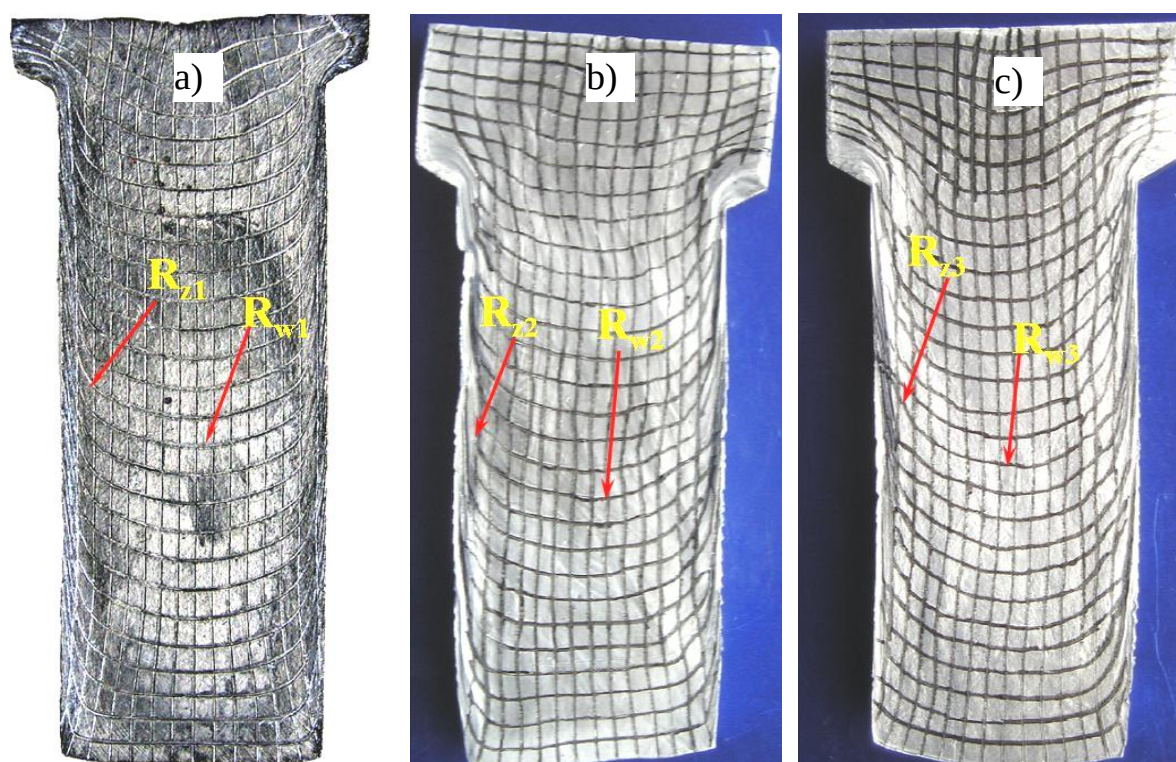
Rys. 6.5.1. Próbką z siatką koordynacyjną do wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Proces wyciskania przeprowadzono w temperaturze 22 °C oraz przy prędkości stempla 0,12 mm/s, co opowiadało średniej prędkości odkształcania $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Podczas procesu rejestrowano siłę wyciskania w funkcji drogi stempla (rys. 6.5.2).



Rys. 6.5.2. Siła wyciskania w funkcji drogi stempla dla ołowiu oraz aluminium wyżarzonego i umocnionego

Dla wszystkich materiałów w pierwszej fazie procesu wyciskania następuje gwałtowny wzrost siły spowodowany spęczaniem umieszczonego w pojemniku materiału. Spęczanie to jest spowodowane niewielką różnicą wymiarów pojemnika i wyciskanego materiału, konieczną do swobodnego włożenia materiału do pojemnika. Następnie rozpoczyna się zasadniczy proces wyciskania, w którym materiał wypełnia matrycę, po czym z niej wypływa; w tej fazie procesu następuje dalszy wzrost siły wyciskania. Dopiero pod koniec procesu wyciskania następuje zmniejszenie siły wyciskania spowodowane zmniejszeniem powierzchni tarcia. Przebiegi uzyskane dla obu rodzajów aluminium mają bardzo zbliżony charakter, jedynie siła wyciskania aluminium umocnionego jest o około 7 % większa niż dla aluminium wyżarzonego. W przypadku ołowiu natomiast siła wyciskania jest wielokrotnie niższa i łagodniej narasta w pierwszej fazie wyciskania oraz zdecydowanie szybciej występuje stan ustalony procesu niż dla aluminium.



Rys. 6.5.3. Odształcone siatki koordynacyjne: a) ołów, b) aluminium umocnione i c) aluminium wyżarzone

Na rys. 6.5.3 przedstawiono odształcone siatki koordynacyjne dla przebadanych materiałów rzeczywistych. Na podstawie analizy makroskopowej zaobserwowano duże różnice w sposobie płynięcia poszczególnych materiałów. Dla aluminium wyżarzonego, charakteryzującego się silnym umocnieniem odkształceniowym rozkład odkształcenia

materiału jest bardzo równomierny w przekroju poprzecznym próbki. Świadczy o tym stałe wygięcie linii siatki koordynacyjnej prostopadłych do kierunku wyciskania. W przypadku aluminium umocnionego wykazującego nieco mniejsze umocnienie odkształcenie lokalizuje się głównie w obszarach leżących blisko matrycy. Promień krzywizny linii siatki koordynacyjnej prostopadłych do kierunku wyciskania w części środkowej próbki (R_{w2}) – rys. 6.5.3 dla aluminium umocnionego jest mniejszy niż dla aluminium wyżarzzonego (R_{w3}). Natomiast w przypadku promieni krzywizny linii przy ściankach zewnętrznych próbki sytuacja jest odwrotna. Ołów charakteryzuje się najbardziej nierównomiernym sposobem płynięcia, o czym świadczą małe wygięcia linii siatki koordynacyjnej w obszarze środkowej części próbki – promień wewnętrzny siatki (R_{w1}) jest bliski ∞ , oraz bardzo duże wygięcie linii w części zewnętrznej próbki (R_{z1}). Jest to związane z tym, że ołów charakteryzuje się osłabieniem odkształceniowym, co ma znaczący wpływ na sposób deformacji materiału.

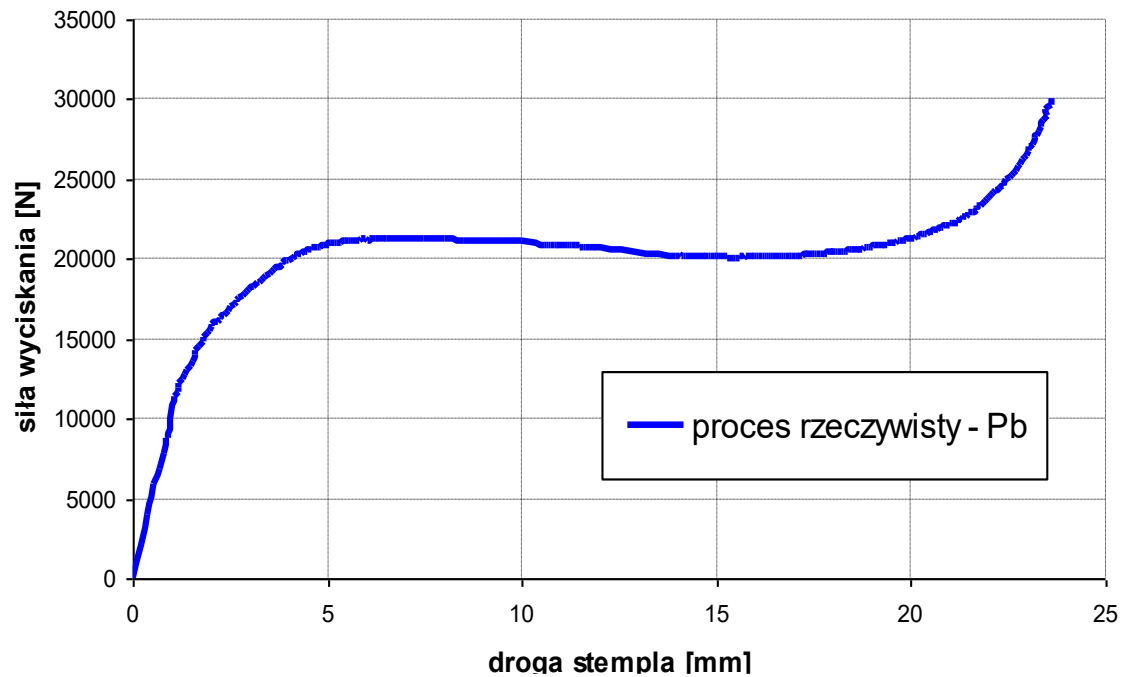
Proces nr 2

Rzeczywisty proces osiowosymetrycznego wyciskania przeciwbieżnego został przeprowadzono tylko dla ołowiu, gdyż ograniczeniem była niska wytrzymałość narzędzi: matrycy, recypienta i stempla. Do procesu zostały przygotowane próbki złożone z dwóch połówek walca (rys. 6.5.4). W celu wyznaczenia rozkładu odkształceń w wyciskany ołowiu na powierzchnię płaską próbek naniesiono siatkę koordynacyjną o boku 2,5 mm.



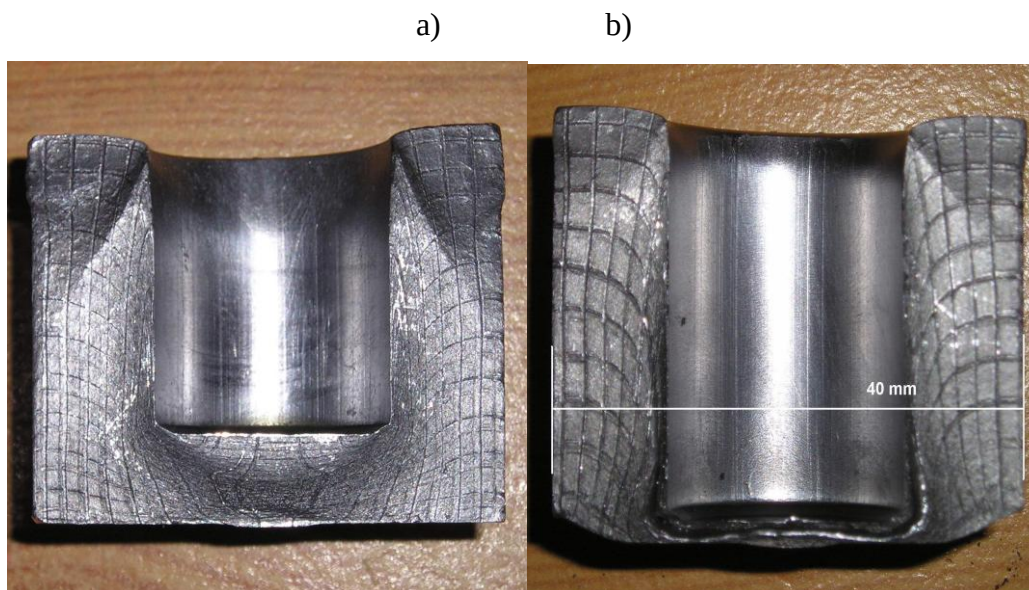
Rys. 6.5.4. Próbkę ołowiu z siatką koordynacyjną przed wyciskaniem

Proces wyciskania przeciwbieżnego ołowiu przeprowadzono przy temperaturze 22 °C oraz dla prędkości liniowej stempla wynoszącej 0,26 mm/s, co opowiadało średniej prędkości odkształcania wynoszącej $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Podczas procesu rejestrowano siłę wyciskania w funkcji drogi stempla, którą przedstawiono na rys. 6.5.5.



Rys. 6.5.5. Zmiana siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego

Natomiast na rys. 6.5.6 przedstawiono próbkę po zagłębieniu stempla na głębokość 17 mm oraz 22 mm.



Rys. 6.5.6. Próbkę po procesie wyciskania a) zagłębienie stempla 17 mm i b) zagłębienie stempla 22 mm

W procesie wyciskania można wyróżnić trzy fazy odkształcania:

- I. faza zbliżona do procesu spęczniania,
- II. faza właściwego wyciskania,

III. końcowy etap wyciskania.

W fazie I procesu wyciskania, występuje spęczanie materiału, czemu towarzyszy znaczny wzrost siły. Właściwe wyciskanie (faza II) odbywa się przy prawie stałej wartości siły, po czym w III fazie występuje jej gwałtowny wzrost i proces należy przerwać.

Prędkość wypływu odkształconego metalu z recypienta jest prawie stała w czasie całego procesu wyciskania. Tarcie bardzo istotnie wpływa na proces wyciskania, przy czym ze względu na duże naciski jednostkowe, charakterystyczne dla tego procesu, opory tarcia są duże. Siły tarcia występujące na powierzchni styku odkształcanego materiału ze stemplem determinują nierównomierność odkształceń. W wyniku oddziaływania oporów tarcia, w procesie wyciskania występują strefy o różnym stopniu odkształcenia. Po stronie stempla tworzy się stożkowa strefa martwa, w której zachodzą małe odkształcenia podobnie jak w przypadku swobodnego spęczania (rys. 6.5.6). Zbyt duża niejednorodność odkształceń powoduje niejednorodność naprężeń, a często nawet pojawienie się pęknięć powierzchniowych. Tego typu pęknięcia w kierunku prostopadłym do kierunku wyciskania obserwuje się często na powierzchni wyciskanych wyrobów.

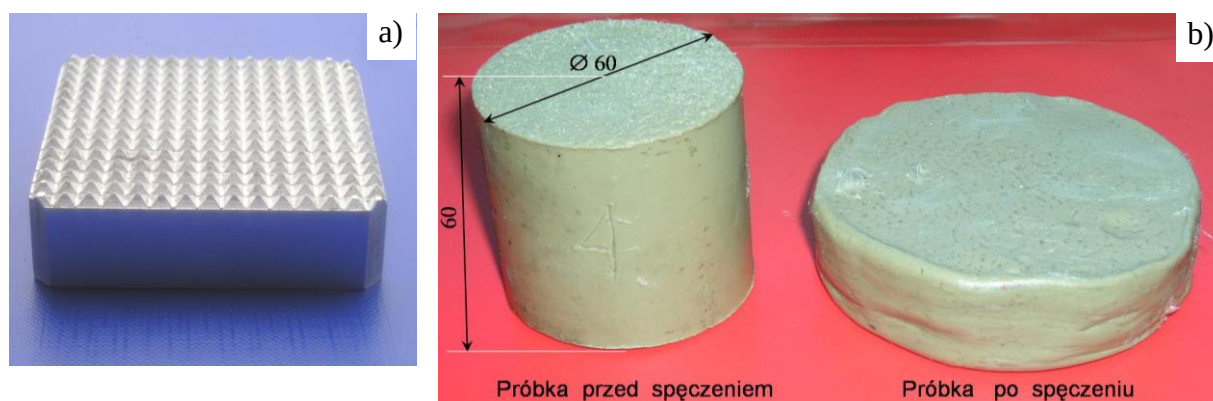
7. WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK MATERIAŁÓW MODELOWYCH – BAZA DANYCH

W celu ułatwienia doboru materiałów modelowych do rzeczywistych została stworzona baza danych zawierająca krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie oraz składy chemiczne różnych mieszanin materiałów modelowych, których materiałem bazowym była filia i plastelina. Okazuje się, że modyfikując ich skład poprzez dodawanie do nich w różnych ilościach następujących substancji: parafiny, kaolinu, lanoliny i kredy oraz zmieniając temperaturę uzyskuje się modele krzywych $\sigma_{upl} - \varepsilon$ dla różnych materiałów rzeczywistych. Zastosowany w badaniach syntetyczny воск filia wyprodukowano w firmie „Filia” w Ølsted w Danii, natomiast plastelinę białą w firmie „Astra-Zenith” S.A. w Częstochowie.

7.1. Opis próby

Krzywe umocnienia materiałów modelowych wyznaczone były w próbie spęczania osiowosymetrycznych próbek walcowych o wysokości 60 mm i średnicy 60 mm. Próbę realizowano do momentu pojawienia się pęknięcia na powierzchni bocznej walców, po upływie 14 dni od wytworzenia próbek modelowych. Podstawowe badania zostały przeprowadzone przy temperaturze 22 °C i dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹. Badania prowadzono również dla innych warunków odkształcania w celu określenia czułości materiałów modelowych na temperaturę i prędkość odkształcania.

Jako środek smarujący użyto wazelinę techniczną, która umieszczona była w specjalnie wykonanych otworkach (w kształcie ostrosłupa prawidłowego o wysokości 2 mm i podstawie kwadratu o długości boku 2 mm) na powierzchniach czołowych próbek, narzędziem przedstawionym na rys. 7.1.1a. Podczas próby nie stwierdzono powstawania becзки na poboczniczy walca, co wskazywałoby na bardzo niski współczynnik tarcia i dlatego pominięto jego wpływ na naprężenie uplastyczniające (rys. 7.1.1b). Dla każdego warunków przeprowadzono 5 eksperymentów. Następnie do analizy wybierano średni przebieg naprężenia.

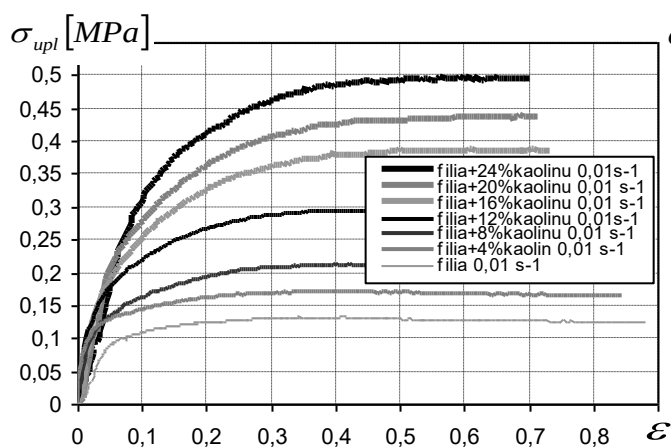


Rys. 7.1.1. a) Narzędzie do wykonywania otworków na powierzchni próbek oraz b) walcowe próbki stosowane w próbie spęczania

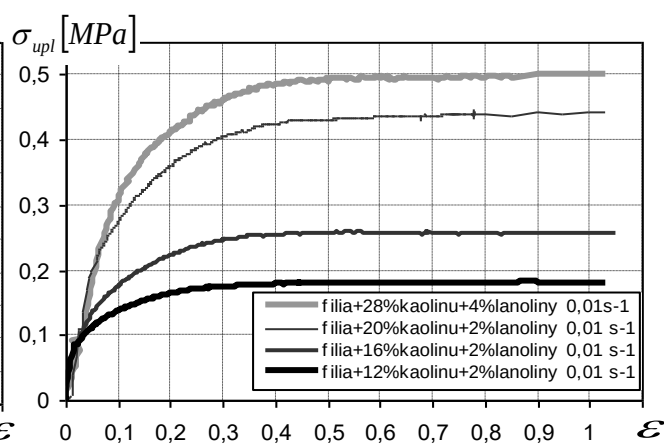
7.2. Wyniki badań

FILIA

Naprężenie uplastyczniające dla filii przy prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$ po osiągnięciu wartości maksymalnej przy odkształceniu 0,35 bardzo nieznacznie się obniża. Dodanie kaolinu do filii powoduje wzrost jej umocnienia, tym większy im większa jest zawartość kaolinu. Dla mieszanin zawierających ponad 8 % kaolinu uzyskujemy wzrost naprężenia w całym zakresie odkształceń. Krzywe takie mogą być zastosowane do modelowania procesu odkształcania rzeczywistych materiałów w warunkach obróbki plastycznej na zimno (rys. 7.2.1).



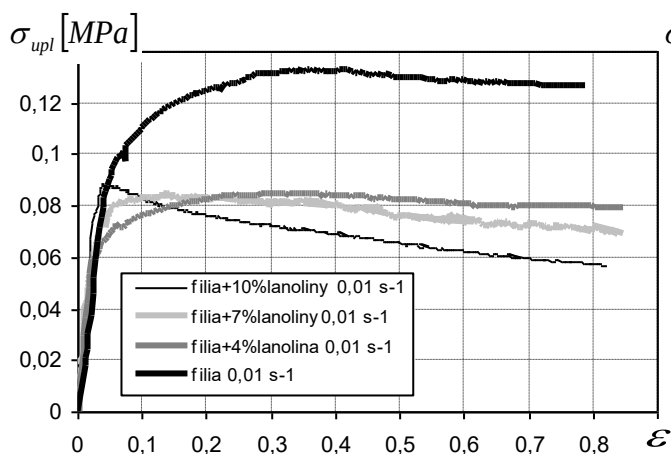
Rys. 7.2.1. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie filii z różną zawartością kaolinu



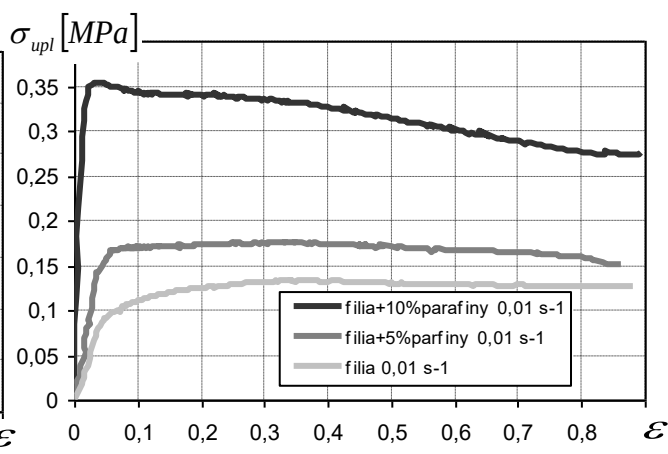
Rys. 7.2.2. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla filii z różną zawartością kaolinu i lanoliny

Wzrost zawartości kaolinu powoduje obniżenie odkształcenia granicznego, filia zawierająca ponad 24 % kaolinu jest tak krucha, że nie nadaje się do modelowania. Dlatego w celu zwiększenia odkształceń granicznych do mieszanin zawierających dużą ilość kaolinu dodawano niewielką ilość lanoliny. Dodatek lanoliny w ilości do 4 % nie wpływa na zmianę kształtu krzywej umocnienia natomiast powoduje wzrost odkształceń granicznych o około 25 %. Krzywe umocnienia takich materiałów przedstawiono na rys. 7.2.2.

W przypadku dodania natomiast do czystej filii tylko lanoliny uzyskuje się krzywe, dla których naprężenie uplastyczniające po osiągnięciu maksymalnej wartości ulega znacznemu obniżeniu. Obniżenie to jest tym intensywniejsze im jest większa zawartość lanoliny w mieszaninie. Wzrost zawartości lanoliny powoduje również zmniejszenie odkształceń krytycznych (rys. 7.2.3). Mieszaniny takie mogą być użyte do modelowania procesów obróbki plastycznej na gorąco. Podobny wpływ na kształt krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie filii ma parafina, z tą różnicą, że powoduje ona znaczny wzrost poziomu naprężenia (rys. 7.2.4).

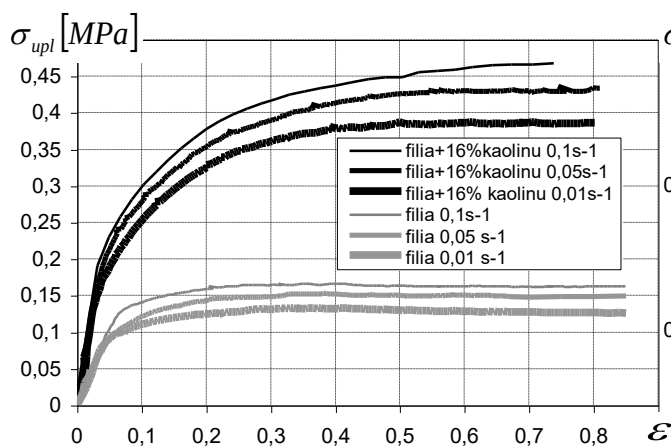


Rys. 7.2.3. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla filii z różną zawartością lanoliny

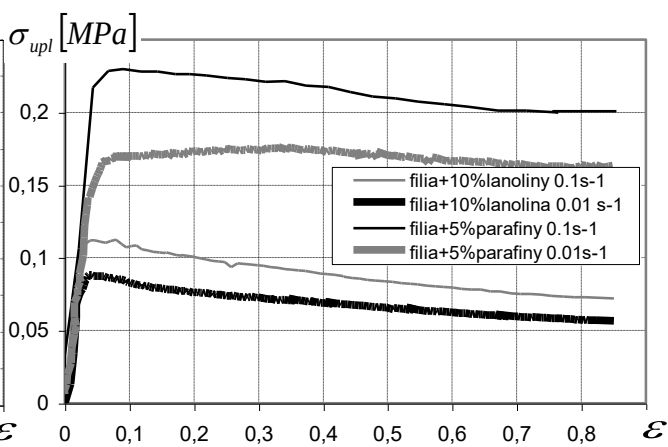


Rys. 7.2.4. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla filii z różną zawartością parafiny

W badaniach określono również wpływ prędkości odkształcania na kształt krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie badanych mieszanin. Z przebiegów przedstawionych na rys. 7.2.5 i 7.2.6 wynika, że zmiana prędkości odkształcania z 0,01 na 0,1 s⁻¹ nie powoduje zmiany charakteru krzywych umocnienia badanych mieszanin, a jedynie dość duży wzrost naprężenia uplastyczniającego.

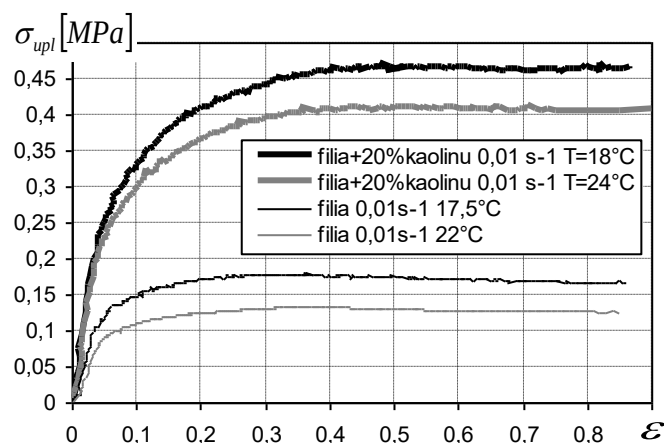


Rys. 7.2.5. Wpływ zmiany prędkości odkształcania na krzywe umocnienia dla filii oraz filii z 16 % kaolinu



Rys. 7.2.6. Wpływ zmiany prędkości odkształcania na krzywe umocnienia dla filii z 5 % parafiny i 10 % lanoliny

Materiały modelowe również charakteryzują się bardzo dużą czułością na temperaturę odkształcania. Obniżenie temperatury o 4÷5 °C powoduje wzrost naprężenia uplastyczniającego filii o około 15 %, przy czym wraz ze zmianą temperatury nie następuje wyraźna zmiana charakteru kształtu krzywych umocnienia (rys. 7. 2.7).

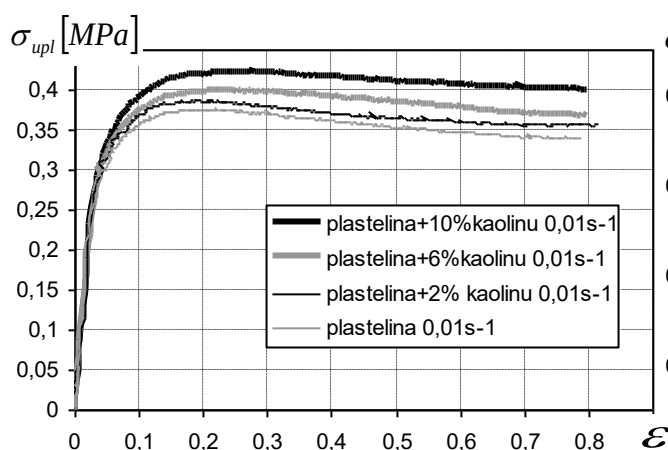


Rys. 7.2.7. Wpływ zmiany temperatury odkształcania na krzywe umocnienia filii i jej mieszanin

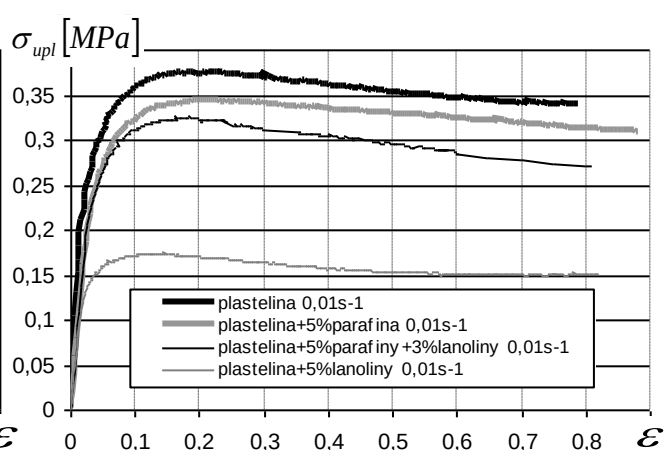
PLASTELINA

Naprężenie uplastyczniające czystej plasteliny dla prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$ po osiągnięciu wartości maksymalnej dla odkształcenia 0,3 ulega obniżeniu. Dodatek kaolinu w różnych ilościach nieznacznie zwiększa poziom naprężenia, lecz nie zmienia kształtu krzywych (rys. 7.2.8).

Natomiast dodatek lanoliny i parafiny powoduje obniżenie naprężenia uplastyczniającego w całym zakresie odkształceń (rys. 7.2.9). Dodatek lanoliny intensywniej obniża naprężenie uplastyczniające niż dodatek parafiny. Stosując plastelinę jak podstawowy składnik nie udało się uzyskać mieszaniny umacniającej się w całym zakresie odkształceń, a więc może być ona stosowana głównie do modelowania procesów obróbki plastycznej na gorąco.

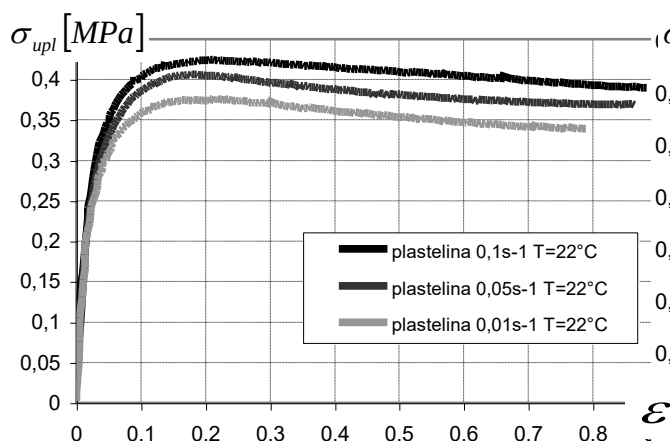


Rys. 7.2.8. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla plasteliny z różną zawartością kaolinu

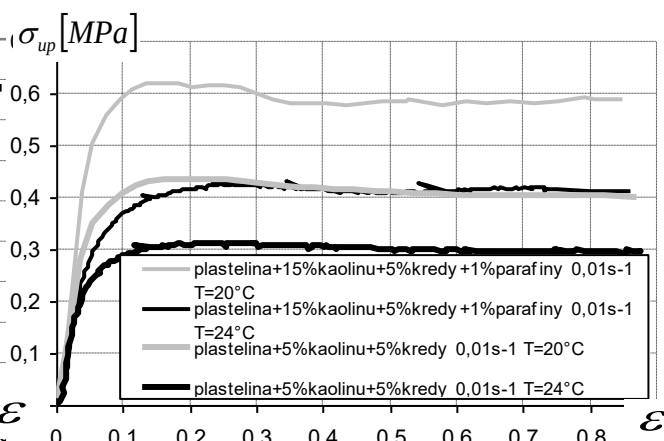


Rys. 7.2.9. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla plasteliny z różną zawartością parafiny i lanoliny

Badania określające wpływ prędkości oraz temperatury odkształcania na kształt krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wykazały, że plastelina podobnie reaguje na zmianę tych parametrów jak filia i jej mieszaniny (rys. 7.2.10 i 7.2.11).



Rys. 7.2.10. Wpływ prędkości odkształcania na krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla plasteliny



Rys. 7.2.11. Wpływ temperatury na krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla plasteliny z 15 % kaolinu 5 % kredy i 1 % parafiny oraz dla plasteliny z 5 % kaolinu i 5 % kredy

W tabeli 7.2.1 zebrane zostały następujące właściwości badanych materiałów modelowych: σ_{max} - maksymalna wartość naprężenia uplastyczniającego, ε_{kr} - odkształcenia krytyczne (brak wartości w tej kolumnie oznacza, że dla danego materiału modelowego odkształcenia krytyczne nie osiągnięto), ε_{gr} - odkształcenia graniczne (wyznaczone były w momencie pojawienia się pęknięć na poboczniczy walca).

Tabela 7.2.1. Właściwości materiałów modelowych na bazie filii i plasteliny.

l.p.	Materiał podstawowy	Modyfikator	Warunki badań		Właściwości		
			T [°C]	$\dot{\varepsilon}$ [s ⁻¹]	σ_{max} [MPa]	ε_{kr}	ε_{gr}
1.	filia	kaolin 2÷4 %	22	0,01	0,128÷0,136	0,38÷0,39	1÷1,05
2.	filia	kaolin 8÷24%	22	0,01	0,209÷0,507	-	0,8÷0,9
3.	filia	kaolin 12÷28 % + lanolina 2÷4 %	22	0,01	0,182÷0,505	0,91	0,95÷1,05
4.	filia	lanolina 4÷14 %	22	0,01- 0,1	0,083÷0,095	0,03÷0,29	1,2
5.	filia	-	22	0,01- 0,1	0,13÷0,17	0,3÷0,41	0,9÷1
6.	filia	kaolin 16 %	22	0,01- 0,1	0,385÷0,47	-	0,8÷0,95
7.	filia	parafina 5÷10 %	22	0,01- 0,1	0,176÷0,356	0,03÷0,09	0,9÷1,05
8.	filia	-	17-22	0,01	0,13÷0,18	0,3÷0,36	0,9÷1,1
9.	filia	kaolin 20 %	18-24	0,01	0,41÷0,46	-	0,8÷0,9
10.	plastelina	-	22	0,01- 0,1	0,37÷0,416	0,17÷0,2	0,9÷1,05
11.	plastelina	kaolin 2÷20 %	22	0,01	0,386÷0,51	0,19÷0,32	0,8÷0,95
12.	plastelina	parafina 5÷10 %	22	0,01	0,323÷0,38	0,21÷0,29	0,85÷1
13.	plastelina	lanolina 5÷10 %	22	0,01	0,12÷0,17	0,11÷0,14	0,9÷1,05
14.	plastelina	kaolin 15%, kreda 5%, parafina 1 %	20-24	0,01	0,417÷0,614	0,14÷0,27	0,8÷0,9
15.	plastelina	kaolin 5 %, kreda 5 %	20-24	0,01	0,3÷0,42	0,19÷0,22	0,8÷0,9

Przeprowadzone badania nad materiałami modelowymi wykazały, że modyfikując ich skład (poprzez dodatki kaolinu, lanoliny, parafiny, kredy) oraz zmieniając prędkość odkształcania i temperaturę uzyskuje się modele krzywych $\sigma_{upl} - \varepsilon$ dla różnych materiałów rzeczywistych. Dodatek kaolinu lub kredy powoduje podniesienie poziomu naprężenia. Krzywe takie mogą być zastosowane dla rzeczywistych materiałów w warunkach obróbki

plastycznej na zimno. Trudno natomiast znaleźć materiały, dla których w całym zakresie odkształceń następuje intensywny wzrost naprężenia uplastyczniającego. Dodatek lanoliny lub parafiny powoduje, że uzyskujemy krzywe, w których naprężenie uplastyczniające po osiągnięciu maksymalnej wartości ulega silnemu obniżeniu. Mieszaniny takie mogą być użyte do modelowania procesów obróbki plastycznej na gorąco. Zmiana prędkości odkształcania z $0,01$ na $0,1 \text{ s}^{-1}$ oraz temperatury w zakresie $17\div 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nie powoduje istotnej zmiany charakteru krzywych umocnienia badanych mieszanin, a jedynie zmianę poziomu naprężenia uplastyczniającego. Podobne zjawisko występuje w przypadku obniżania temperatury. Plastelina oraz jej mieszaniny wykazują podobne zachowanie na dodatki, zmianę prędkości odkształcania oraz zmianę temperatury jak mieszaniny filii. Przy czym kształt krzywych umocnienia filii można modyfikować w większym stopniu poprzez dodanie różnych składników niż kształt krzywych umocnienia dla plasteliny.

7.3. Metoda invers jako weryfikacja krzywych umocnienia dla materiałów modelowych

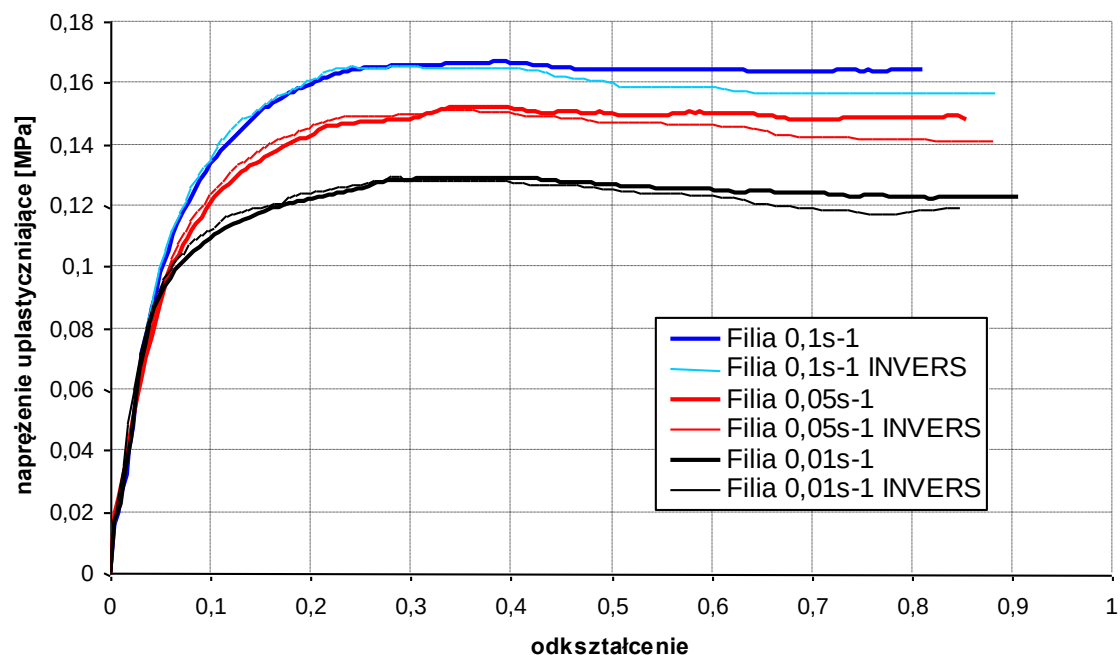
Podobnie jak w przypadku materiałów rzeczywistych metodą invers wyznaczono krzywe umocnienia jedynie jednego materiału modelowego. Jako reprezentacyjny materiał modelowy wybrano czysty воск filia.

W eksperymencie przeprowadzono próbę spęczania walcowych próbek wykonanych z wosku filii o wymiarach $60\times 60 \text{ mm}$, przy użyciu wazeliny technicznej, jako środka smarnego, przy stałej temperaturze wynoszącej $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Podczas procesu mierzona była siła w funkcji przemieszczenia narzędzia. Uzyskane przebiegi były danymi wejściowymi dla modelu odwrotnego.

W tabeli 7.3.1. przedstawiono pomiary beczkowatości próbek i wyznaczone czynniki tarcia przy użyciu metody invers dla wosku filia. Natomiast na rys. 7.3.1 przedstawiono krzywe umocnienia dla materiału modelowego wyznaczone w sposób analityczny oraz krzywe umocnienia wyznaczone metodą invers.

Tabela 7.3.1. Beczkowatość próbek i wartości czynnika tarcia wyznaczone metodą invers

Test	beczkowatość β	czynnik tarcia m
filia, $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$	0,0123	0,021
filia, $\dot{\varepsilon} = 0,05 \text{ s}^{-1}$	0,0151	0,027
filia, $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$	0,0169	0,031



Rys. 7.3.1. Porównanie krzywych umocnienia aluminium wyżarzzonego wyznaczonych analitycznie oraz metodą invers

Przedstawione wyniki badań dotyczące krzywych umocnienia materiału modelowego uzyskane z metody odwrotnej wykazują dość dobrą zgodność do rezultatów krzywych umocnienia wyznaczonych w sposób analityczny. Wpływ tarcia jest widoczny dopiero przy odkształceniu większym od 0,4. Przy czym im większa prędkość odkształcania, tym większy wpływ tarcia na napężenie uplastyczniające. Niska wartość beczkowatości dla tego materiału, przy stosunkowo dużych wymiarach świadczy o bardzo małym wpływie tarcia na napężenie uplastyczniające. Dlatego dla pozostałych materiałów przyjęto krzywe umocnienia wyznaczone w sposób analityczny.

7.4. Analiza zachowania miękkich materiałów modelowych na bazie filii i plasteliny podczas odkształcania

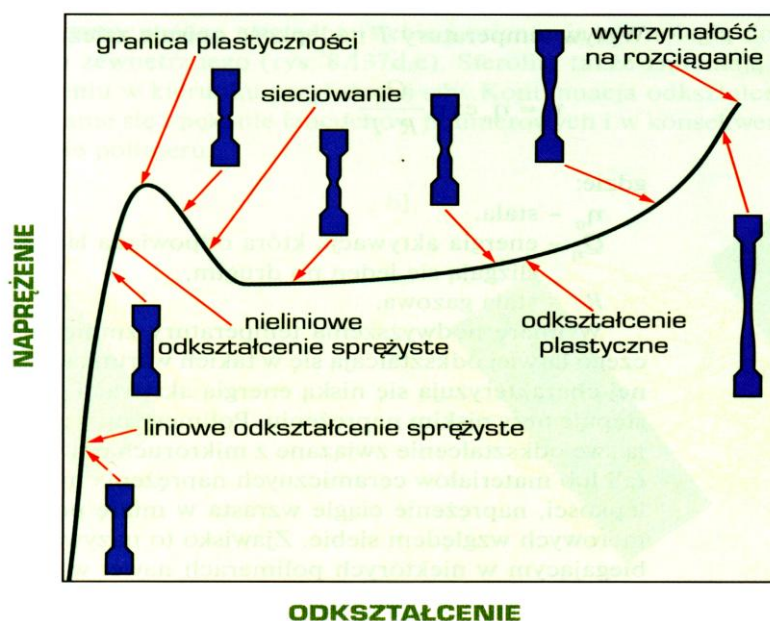
W rozdziale 2.4.2 przedstawiono ogólną charakterystykę materiałów polimerowych oraz zachowanie się pojedynczych polimerów pod wpływem obciążeń i temperatury. Wyjaśniono również szereg zjawisk ściśle związanych z materiałami polimerowymi, które wydają się być nieodzowne w przypadku próby wyjaśnienia przyczyn umacniania, czy też osłabiania miękkich materiałów modelowych stosowanych w modelowaniu fizycznym procesów przeróbki plastycznej. Należy tu jeszcze raz podkreślić, że podstawową i najważniejszą trudnością wyjaśnienia sposobu odkształcania się tych materiałów (pod wpływem obciążenia, zmian prędkości odkształcania i temperatury oraz modyfikatorów) jest brak dostatecznych informacji na temat składu chemicznego, budowy strukturalnej i ich wytwórstwa. O ile wyjaśnienie zachowania się pojedynczego polimeru pod wpływem w/w czynników nie jest zbyt złożone, o tyle wyjaśnienie tego typu zjawisk dla miękkich materiałów modelowych na bazie wosku filii i plasteliny jest znacznie bardziej skomplikowane. W analizie tego zagadnienia oparto się przede wszystkim na dostępnej literaturze specjalistycznej, wiedzy i doświadczeniu naukowców z tej dziedziny oraz na badaniach własnych autora [59].

Na podstawie przedstawionych informacji w dalszych rozważaniach przyjęto i ustalono, że czysty wosk filia jest mieszaniną lub stopem syntetycznych i naturalnych polimerów (głównie poliestrów) oraz innych substancji organicznych i nieorganicznych (znanego i nieznanego pochodzenia), o charakterze układu częściowo mieszalnego. Z kolei plastelina w swoim składzie chemicznym zawiera o wiele więcej zanieczyszczeń, co powoduje jej mniej stabilne własności (reologię), w porównaniu do filii; wykazuje większą tendencję do tiksotropii. Natomiast w przypadku wprowadzania do filii lub plasteliny dodatków w postaci wypełniaczy proszkowych (kaolin, kreda) oraz cieczy organicznych (lanolina, parafina i wazelina) należy traktować te materiały jako kompozytowe stopy polimerowe. Szczegółowej analizie poddano w pierwszej kolejności czysty wosk filia oraz plastelinę, następnie przeanalizowano wpływ wybranych wypełniaczy – modyfikatorów.

Makroskopowa analiza powierzchni oraz przełomu obu materiałów wskazuje, że posiadają one strukturę zdecydowanie bardziej polimorficzną, niż semikrystaliczną, o bardzo małym lub wręcz znikomym usieciowaniu. Materiały wykazują dobre cechy formowania oraz płynięcie przy temperaturach zbliżonych do pokojowych ($T_g < T_p$), co potwierdzałoby ich polimorficzną, słabo usieciowaną strukturę oraz obecność wielu innych polimerów i substancji, o właściwościach zbliżonych do elastomerów i plastyfikatorów.

Temperatura zeszklenia filii wahała się w granicach $8 \div 14$ °C. Dla plasteliny zaobserwowano nieznacznie wyższą temperaturę zeszklenia wynoszącą $10 \div 18$ °C. Oba materiały są bardzo czułe na zmiany temperatury i prędkości odkształcania, co jest charakterystyczną cechą większości termoplastów [124]. Potwierdzają to również przeprowadzone przez autora i innych badania ich właściwości mechanicznych. Analizując odkształcanie badanych materiałów modelowych posłużono się krzywą rozciągania typowego polimeru termoplastycznego (rys. 7.4.1). Natomiast w tabeli 7.4.1 przedstawiono charakterystykę odkształcenia polimerów pod wpływem działających sił i temperatur. Odkształcanie polimerów jest bardzo złożonym procesem, ze względu na rodzaj odkształcenia oraz mechanizmy strukturalne.

Przy temperaturze otoczenia w początkowym zakresie odkształcania czystej filii występuje liniowy stan sprężysty, który można opisać prawem Hook'a. W plastelinie w zbliżonych warunkach, szczególnie przy nieco niższych temperaturach i większych prędkościach odkształcania można było niekiedy zaobserwować występowanie stanu sprężysto-kruchego. Początkowe odkształcenie sprężyste badanych materiałów modelowych jest podobne do odkształceń sprężystych w metalach i ich stopach, i jest związane ze sprężystym odkształceniem wiązań metalicznych, jonowych i kowalencyjnych między atomami. W strukturze tych materiałów dochodzi wówczas do mikro a następnie do makroruchów Browna, powodujących najpierw częściowy ruch pojedynczych jednostek monomerycznych a następnie większej ilości segmentów makrocząsteczek.



Rys. 7.4.1. Schemat krzywej rozciągania dla typowego termoplastycznego materiału polimerowego

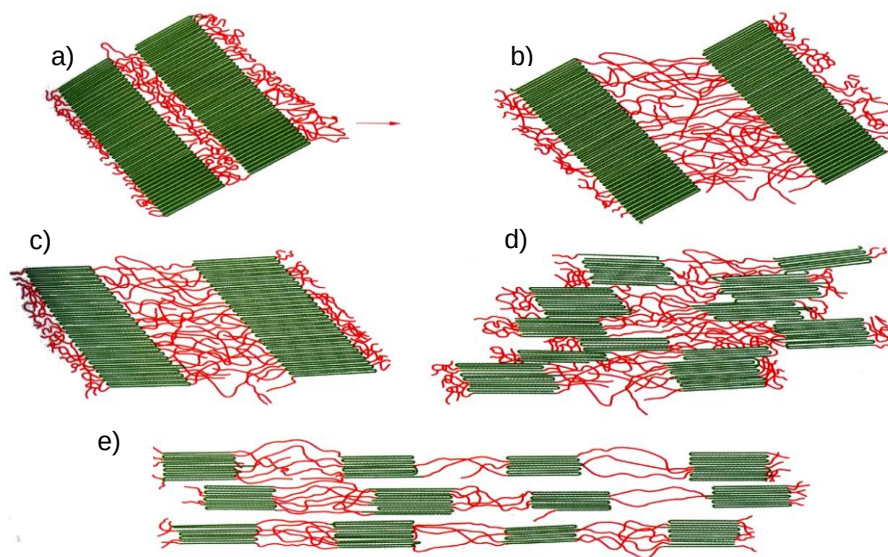
Tabela 7.4.1. Charakterystyka odkształcania polimerów poddanych działaniu obciążeń mechanicznych [37]
(opracowano wg Saechtling Kunststoff-Taschenbuch)

Rodzaj odkształcenia	Mechanizm strukturalny	Odkształcenie w funkcji czasu przy		Zmiana modułu sprężystości przy wzroście temperatury	Warunki dla idealnej efektywności		
		obciążaniu	odciążaniu		Stan temperaturowy	Mikroruchy Browna	Makroruchy Browna
Energetyczno-sprężysty (także: samorzutnie sprężysty)	Zmiana konfiguracji bez wymiany cząsteczkowej	Odkształcenie samorzutne	Odkształcenie samorzutne odwracalne	Niewielki spadek (podobnie do stali) ok. 10^4 Pa	Szklisty	Minimalne	Minimalne
Entropowo-sprężysty (także: gumopodobny lub skóropodobny sprężysty)	Zmiana konfiguracji, Mikroruchy Browna	Odkształcenie samorzutne	Odkształcenie samorzutne	Wzrost liniowy (podobnie do gazu) $1-10^3$ Pa	Termo-sprężysty	Maksymalne	Maksymalne
Plastyczny (także: lepkosprężysty)	Zmiana konfiguracji, Makroruchy Browna	Odkształcenie samorzutne	Odkształcenie plastyczne nieodwracalne	Spadek wykładniczy (podobnie do cieczy) $<10^{-1}$ Pa	Termo-plastyczny	Minimalne	Maksymalne

Tak jak stwierdzono wcześniej filia i plastelina składają się z mieszanin lub stopów polimerów (o ograniczonej mieszalności) z liniowymi i ewentualnie rozgałęzionymi makrocząsteczkami. Odkształcenie sprężyste należy, dlatego utożsamiać również ze splątaniem i dużym zniekształceniem łańcuchów tego samego oraz różnych polimerów, zwłaszcza, gdy ich obciążanie odbywa się przy temperaturze bliskiej temperatury zeszklenia. Po usunięciu naprężenia te segmenty łańcuchów powracają niekiedy do swych pierwotnych położeń. W wyniku zwiększania obciążenia polimery termoplastyczne o dużej masie cząsteczkowej i długich łańcuchach mogą wejść w stan wysokoelastyczny, zwany również stanem nieliniowych odkształceń sprężystych. Przy czym w badanych materiałach modelowych nie stwierdzono występowania stanu wysoko-elastycznego, co można tłumaczyć małym lub znikomym usieciowaniem i niską lepkosprężystością.

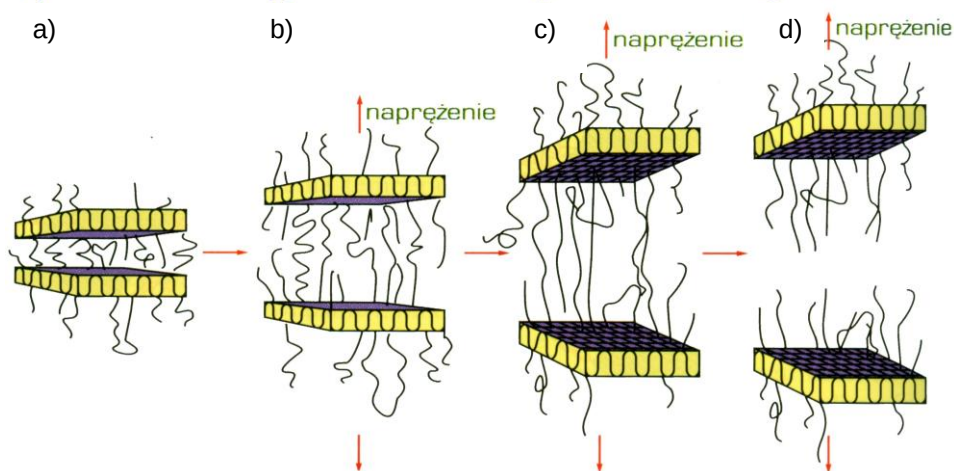
Typowe odkształcenie plastyczne pojawia się po przekroczeniu granicy plastyczności, którą można raczej nazwać umowną, bowiem trudno jest dokładnie określić jej wartość. Trwałe odkształcenie plastyczne dla filii i plasteliny jest związane z rozkręcaniem, rozciąganiem (prawdopodobnie wcześniej częściowo zorientowanych), i rozsypywaniem, a następnie przemieszczaniem (mikro i makroruchy Browna), a w miejscach splątania i węzłów z wyprostowywaniem się łańcuchów pod wpływem przyłożonego obciążenia. Początkowo łańcuchy polimerów mogą być mniej lub bardziej splątane i skręcone (najczęściej w postaci skłębionych łańcuchów), bowiem powstające struktury zależą istotnie od warunków

mieszania oraz temperatury w stanie upłynnionym (stopionym). Zwiększanie naprężenia sprzyja rozplątaniu i wyprostowywaniu łańcuchów. Często po tym zakresie odkształcenia może występować sieciowanie umożliwiające przemieszczanie się łańcuchów przy mniejszej wartości naprężenia, co może być przyczyną tzw. osłabienia na wykresie $\sigma_{upl} - \varepsilon$, tłumaczonego w przypadku metali zdrowieniem lub rekrytalizacją dynamiczną. Natomiast przy braku sieciowania (wiązań poprzecznych), sąsiadujące łańcuchy mogą ślizgać się po sobie w sposób analogiczny do poślizgu w sieci krystalicznej, co prowadzi do dalszych odkształceń plastycznych. W celu lepszego zobrazowania i wyjaśnienia odkształcania się badanych materiałów modelowych wykorzystano rysunki przedstawiające poszczególne fazy odkształcania polimerów semikrystalicznych. W trakcie odkształcania polimerów o strukturze częściowo krystalicznej w lamelach krystalicznych sferolitów, w początkowym etapie fałdy ulegają skręceniu i wyprostowaniu. Następnie zachodzi rozszerzenie się struktury amorficznej wraz z odkształceniem (rys. 7.4.2a-c). W efekcie lamele krystaliczne ulegają fragmentacji (crazing) na drobniejsze jednostki, wykazujące wzajemny poślizg względem siebie oraz orientację równoległą do działającego obciążenia zewnętrznego (rys. 7.4.2d-e). Podczas plastycznej deformacji polimeru semikrystalicznego także sferolity zmieniają kształt i ulegają wydłużeniu w kierunku przyłożonej siły [37].



Rys. 7.4.2. Stadia odkształcenia polimerów semikrystalicznych: a) struktura dwóch lamelarnych obszarów krystalicznych oraz międzylamelarnej przestrzeni o strukturze amorficznej przed odkształceniem, b) wydłużenie amorficznych wiążących łańcuchów podczas pierwszego stadium odkształcenia, c) obrót obszarów lamelarnych łańcuchów podczas drugiego stadium odkształcenia, d) fragmentacja segmentów obszarów krystalicznych podczas trzeciego stadium odkształcenia, e) orientacja segmentów obszarów oraz łańcuchów wiążących równoległe do przyłożonego naprężenia w końcowym stadium odkształcenia (wg J.M. Schultza) [37]

Odształcenie plastyczne zlokalizowane jest w kierunku prostopadłym do przyłożonego naprężenia następuje proces fragmentacji powierzchni. Łańcuchy wiążące pomiędzy lamelami krystalicznymi ulegają rozplątaniu i wyprostowywaniu, a w końcu następuje rozdzielanie bloków krystalicznych (rys. 7.4.3).



Rys. 7.4.3. Kolejne stadia fragmentacji i pęknięcia semikrystalicznego [37] (wg A. Lusigera)

Wywołuje to rozwój pustek prostopadle do kierunku działania naprężeń rozciągających pomiędzy wydłużonymi łańcuchami [37, 42, 43]. Powstałe pustki zapoczątkowują proces niszczenia materiału. Pojawianie się pęknięć na pobocznicach walcowej próbki jest związane z występowaniem objętości swobodnej i rozwojem pustek pomiędzy łańcuchami. Pękanie materiału nie jest wynikiem zrywania łańcuchów polimerowych, lecz tworzeniem się wolnych przestrzeni międzyłańcuchowych [43]. Dalsza kontynuacja odkształcenia może powodować wysupływanie się łańcuchów polimerowych, rzadko ich pękanie, zwłaszcza, gdy spęczanie próbek odbywa się najczęściej w warunkach statycznych [124]. Wzrost naprężenia uplastyczniającego w końcowym etapie odkształcania (rys. 7.4.1) jest efektem bardzo dużej wytrzymałości łańcuchów makrocząsteczek oraz niekiedy ich wzajemnym splątaniem między sobą.

Zagadnienie odkształcania wosku filia, czy plasteliny wraz z modyfikatorami jest nieco inne i jak wspomniano powyżej należy traktować taki materiał jak kompozytowy stop polimerowy. W tym przypadku dodatki: kaolinu, kredy, lanoliny, wazeliny i parafiny, zwane napelniającami mają zróżnicowany wpływ na właściwości fizyczne, a zwłaszcza mechaniczne całej kompozycji materiału modelowego. Istotną rolę odgrywają właściwości poszczególnych modyfikatorów oraz takie zjawiska jak: adhezja, swobodna energia powierzchniowa, lepkość, zwilżalność, układ strukturalny, twardość itp. Należy zaznaczyć, że żadna z dodawanych substancji nie wchodzi w reakcje chemiczne z makrocząsteczkami polimerów; są to oddziaływania głównie fizyczne (niekiedy na poziomie molekularnym) i zależą przede

wszystkim od właściwości modyfikatorów. Można mieć jednak do tego stwierdzenia pewne zastrzeżenia. Bowiernie podczas przygotowywania całej kompozycji, przy intensywnym mieszaniu przy temperaturze około 170 °C mogą zachodzić pewne reakcje chemiczne. Przy tak wysokich temperaturach może nastąpić konformacja oraz degradacja łańcuchów (pękanie wiązań drugorzędowych) niektórych związków polimerycznych [124].

Poniżej przedstawiono opis oraz wpływ niektórych spośród modyfikatorów na odkształcanie całego kompozytowego stopu polimerycznego. Oczywiście inny wpływ na właściwości całej kompozycji mają wypełniacze proszkowe, tj. kaolin i kreda (trudnorozpuszczalne), które umacniają materiał, a inne substancje ciekłe: lanolina, parafina, wazelina, które wywołują efekt osłabienia na wykresie $\sigma_{upl} - \varepsilon$.

Kaolin – uwodniony tlenek glinu ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) ma twardość 3 w skali Mohsa i stosowany jest jako wypełniacz (ekstender) oraz opóźniacz palenia, gdyż w wysokiej temperaturze wydzielają się cząstki wody. Jest głównie stosowany do poliestrów.

Kreda – węglan wapnia ($CaCO_3$) – gęstość 2,7 g/cm³, twardość 3 w skali Mohsa. Wypełniacz niewłóknisty, dodawany w ilości do 10 % wag., ulepsza wiele własności fizycznych i mechanicznych. W celu lepszego zdyspergowania w matrycy (osnowie) polimeru jego powierzchnię traktuje się kwasem stearynowym.

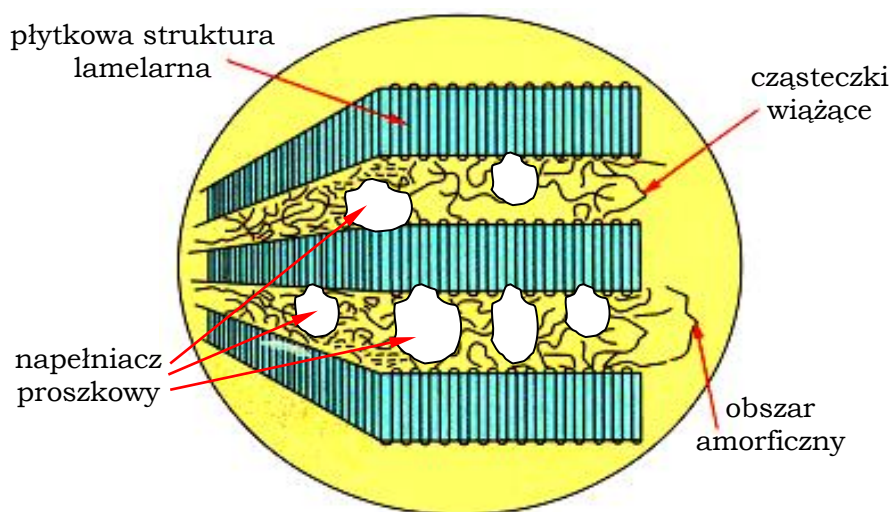
Wazelina - jeden z produktów destylacji ropy naftowej. Rzadka, mazista substancja, bezwonna, niskotopliwa, niewysychająca. O zabarwieniu od białego poprzez żółty do brązowego; we wszystkich wypadkach średnio przezroczysta. Jest mieszaniną węglowodorów parafinowych (alkanów) z pogranicza stałego i ciekłego stanu skupienia w normalnych warunkach otoczenia - głównie są to: $C_{22}H_{46}$ i $C_{23}H_{48}$ o temperaturze początku topnienia: 35÷45 °C.

Lanolina - to воск zwierzęcy otrzymywany podczas czyszczenia wełny owczej. Jest mieszaniną estrów kwasów tłuszczowych ze sterolami (m.in. z cholesterolem). Ma postać żółtawej, lepkiej masy tworzącej z wodą emulsję.

Parafina – mieszanina stałych węglowodorów nasyconych, o temperaturze topnienia 42÷72 °C, nierozpuszczalna w wodzie i alkoholu, rozpuszczalna w benzynie, benzenie, chloroformie i wielu innych rozpuszczalnikach. Odporna na działanie kwasów i zasad.

W przypadku dodania kaolinu i kredy, w zależności od wielkości i kształtu cząstek, wypełniacze te mogą wchodzić między poskręcane zespoły łańcuchów (całkowicie amorficzny kompozytowy stop polimerowy) lub pomiędzy obszary amorficzne łączące krystaliczne lamele (semikrystaliczny kompozytowy stop polimerowy), jak to pokazano na rys. 7.4.4.

Jednakże jest to możliwe jedynie w przypadku bardzo małych cząstek napelniacza. W momencie umiejscowienia się takiej cząstki w obszarach amorficznych znaczenia nabierają zjawiska adhezyjne i związana z nimi swobodna energia powierzchniowa oraz lepkość.



Rys. 7.4.4. Schemat wchodzenia cząstki napelniacza proszkowego pomiędzy obszary amorficzne

Im większa adhezja i wartość energii powierzchniowej tym cząstka napelniacza (kaolinu lub kredy) silniej utrudnia przemieszczanie i rozsupływanie się pozwijanych, kłębiastych łańcuchów makrocząsteczek polimerów, co przejawia się znacznym wzrostem siły. Należy również wspomnieć, że zarówno kreda, jak i kaolin są cząsteczkami polarnymi, a każdy dipol jest bardziej aktywny niż cząsteczka liniowa. Także jego polarna budowa – sprawia, że łatwiej może przyczepiać się i złączać łańcuchy polimerów powodując znaczne utrudnienie w makroruchach Browna i uniemożliwiając odkształcenie. Z badań własnych autora oraz innych naukowców wynika, że o wielkości umocnienia decyduje przede wszystkim ilość modyfikatora. Zwiększenie ilości napelniacza powoduje istotne podniesienie poziomu naprężenia, jednakże w większości przypadków materiał umacnia się w początkowym zakresie odkształceń ($0 \div 0,2$), natomiast przy większych odkształceniach ($0,2 \div 1$) zauważa się nasycenie i utrzymywanie się naprężenia na stałym poziomie. Dodatkowo im większa jest ilość napelniacza proszkowego w materiale, tym większy poziom naprężenia, lecz materiał taki szybciej ulega pękaniu, co powoduje zmniejszenie jego odkształceń granicznych. Ponadto ilość dodawanych modyfikatorów: kaolinu lub kredy jest ograniczone. Przy zawartości napelniacza powyżej 20-28 % całkowitego ciężaru materiału modelowego dochodzi do perkolacji, czyli do szepiania się cząstek modyfikatora. Perkolacja uniemożliwia właściwe wymieszanie, a tym samym odpowiednie rozmieszczenie cząstek napelniacza w osnowie materiału modelowego. W celu zmniejszenia zjawiska perkolacji oraz

uzyskania większych odkształceń granicznych w mieszaninach z dużą zawartością napęniacza proszkowego dodaje się niewielką ilość lanoliny, parafiny lub wazeliny.

Lanolinę, parafinę oraz wazelinę w przypadku ich wprowadzania do filii lub plasteliny należy traktować jak substancje plastyfikujące. *Plastyfikatory* są cieczami organicznymi o względnie małych ciężarach cząsteczkowych ($100 \div 1000$) oraz niskiej wartości energii powierzchniowej, które w większości rozpuszczają się w polimerach w stanie stałym. Łańcuchy polimeru są rozpychane przez oleistą ciecz, pokrywającą je jak smar, co sprawia, że mogą one łatwiej ześlizgiwać się po sobie. A więc plastyfikatory powodują, że polimer staje się bardziej elastyczny – a jego powierzchnia jest jakby nieznacznie bardziej zaolejona. Powoduje to w efekcie obniżenie T_g polimeru. Początkowo poziom granicy plastyczności podnosi się wskutek dużej lepkości w momencie rozpoczęcia odkształcania, a następnie obniża (niska energia powierzchniowa) powodując jednocześnie zwiększenie odkształceń granicznych. Im większa zawartość plastyfikatora w polimerze, tym intensywniej wzrasta początkowo granica plastyczności – przesunięcie odkształceń krytycznych w stronę mniejszych wartości, z kolei dla większych odkształceń następuje szybszy spadek poziomu naprężenia, aż do momentu pęknięcia. Również w przypadku tych substancji można mieć pewne zastrzeżenia, jeżeli chodzi o wysoką temperaturę, przy której przygotowuje się kompozycje materiału modelowego. Nie wiadomo, bowiem, czy przy tak wysokiej temperaturze nie dochodzi do chemicznego rozkładu tych substancji, zwłaszcza, że w trakcie topienia całej kompozycji daje się zauważyć ułatwiające się opary. Może dochodzić wówczas do rozpadu tych substancji oraz tworzenia się innych, nieznanych związków chemicznych, istotnie wpływających na właściwości materiału modelowego.

Z przedstawionej analizy wynika, że odkształcaniu materiałów modelowych towarzyszą niezwykle interesujące, a zarazem bardzo złożone zjawiska. Pomimo że ich poznanie jest bardzo trudne i kosztowne, badania takie powinny być kontynuowane, gdyż pozwoliłyby prawdopodobnie uzyskać materiały modelowe o jeszcze większej różnorodności właściwości, a co za tym idzie przyczyni się to do jeszcze lepszego wykorzystania materiałów modelowych w analizie procesów kształtowania plastycznego.

8. DOBÓR MATERIAŁÓW MODELOWYCH

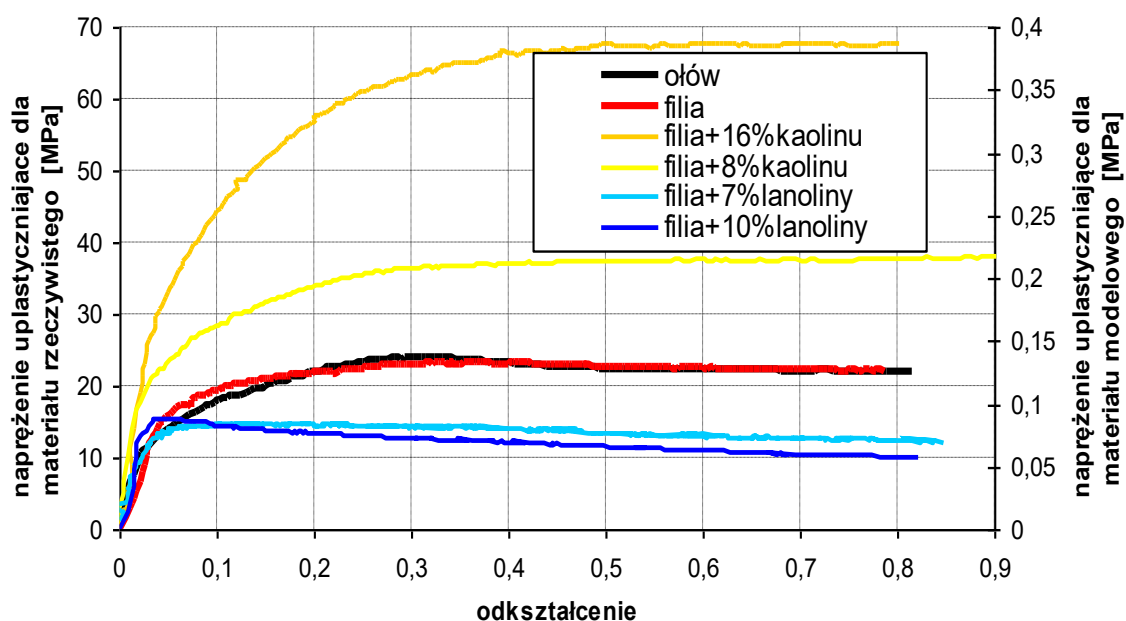
W celu doboru materiałów modelowych do wybranych materiałów rzeczywistych przebadano różne mieszaniny wosków i plasteliny oraz skorzystano ze stworzonej **bazy danych**, przedstawionej w rozdziale 7. Ostatecznego doboru dokonano przede wszystkim w oparciu o zaproponowany nowy opis warunku podobieństwa plastycznego.

8.1. Określenie warunku podobieństwa plastycznego

OLÓW

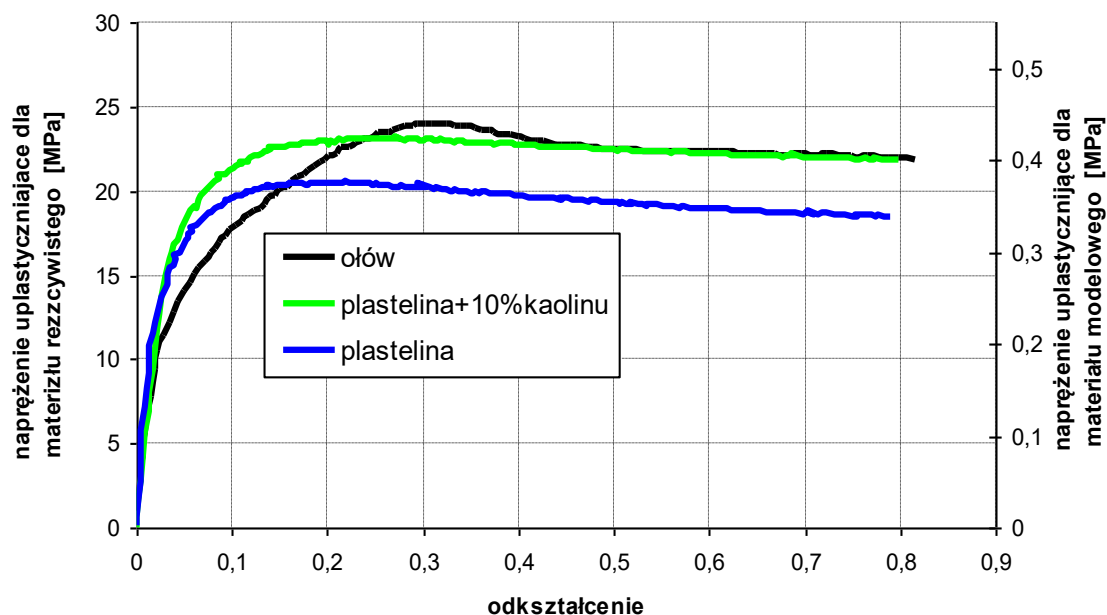
Na podstawie wstępnej analizy jakościowej krzywych umocnienia materiałów modelowych zawartych w bazie danych wybrano materiały modelowe o różnym stopniu dopasowania do krzywej umocnienia ołowiu. Następnie zgodnie z zaproponowanym warunkiem podobieństwa plastycznego wyznaczono dla nich i porównano wartości współczynników podobieństwa t_{sr} oraz współczynnika skali C_{sr} w odniesieniu do ołowiu.

Skład chemiczny, wartość współczynnika skali C_{sr} oraz współczynnika podobieństwa t_{sr} dla poszczególnych mieszanin przedstawiono w tabeli 8.1.1. Natomiast krzywe umocnienia dla tych materiałów oraz ołowiu przedstawiono na rys. 8.1.1. Wartości współczynników t_{sr} , C_{sr} zostały wyznaczone dla prędkości odkształcania 0,01 i 0,1 s⁻¹. Stwierdzono, bowiem, że takie zakresy prędkości odkształcania występowały w odkształcanym materiale dla zastosowanej prędkości stempla wynoszącej 0,52 mm/s dla procesu wyciskania przeciwbieżnego oraz 0,12 mm/s dla wyciskania współbieżnego.



Rys. 8.1.1. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia wybranych mieszanin wosków oraz ołowiu dla prędkości odkształcania 0,01 s⁻¹

Przebadano także mieszaniny na bazie plasteliny. W tym przypadku wybrano jedynie te materiały modelowe, które zawierały w swoim składzie kaolin, gdyż dla pozostałych modyfikatorów obserwowano intensywny spadek naprężenia uplastyczniającego po osiągnięciu maksymalnej wartości. Na rys. 8.1.2 przedstawiono przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia dla tych materiałów modelowych oraz ołowiu.



Rys. 8.1.2. Przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia wybranych materiałów modelowych oraz ołowiu dla prędkości odkształcania $0,01\text{s}^{-1}$

Tabela. 8.1.1. Wartości współczynników, t_{sr} i C_{sr} oraz skład chemiczny materiałów modelowych zastosowanych do modelowania odkształcania ołowiu

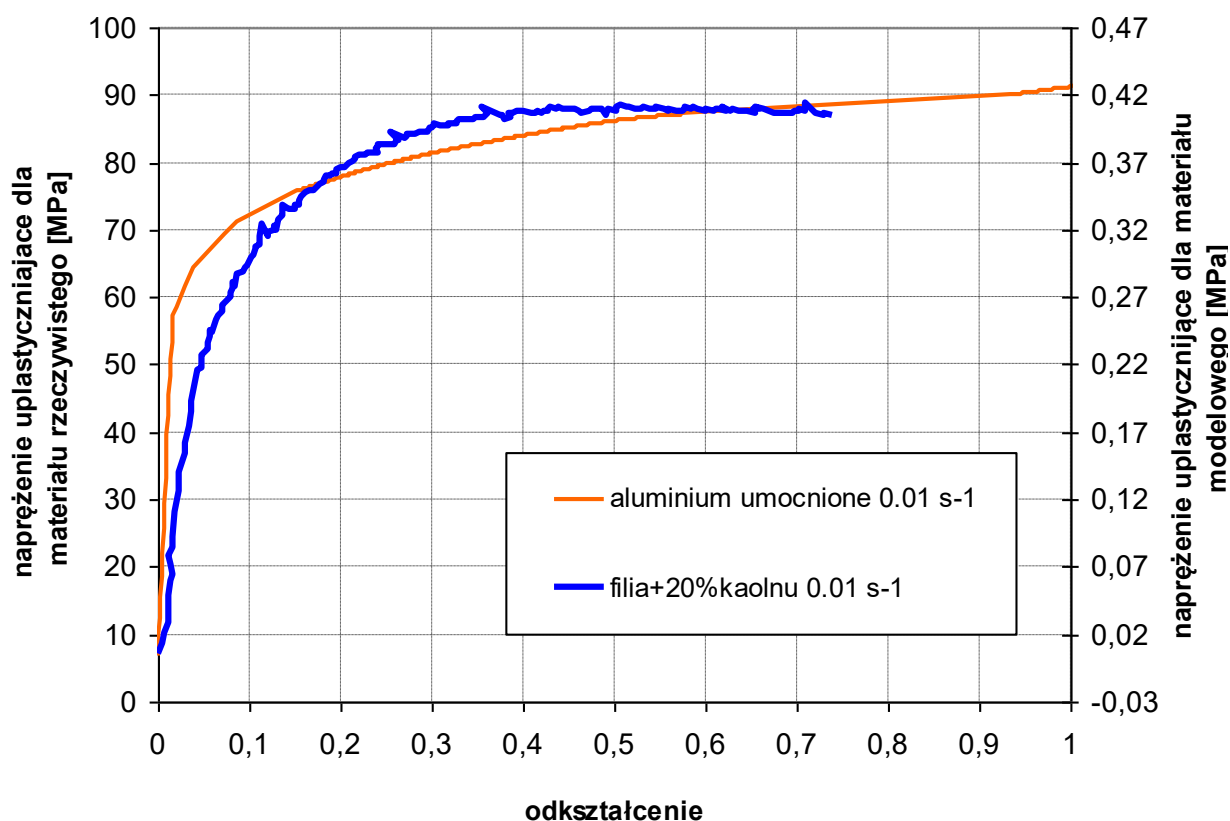
Skład chemiczny	t_{sr}	C_{sr}
filia + 10 % lanoliny	0,147	309
filia + 7 % lanoliny	0,106	268,69
filia + 8 % kaolinu	0,043	114,06
filia + 16 % kaolinu	0,06	63,06
plastelina	0,13	62,519
plastelina + 10 % kaolinu	0,045	53,647
filia	0,035	173,32

Na podstawie wartości współczynników podobieństwa t_{sr} zawartych w tabeli 8.1.1 można stwierdzić, że krzywa umocnienia filii jest najlepiej dopasowana do krzywej umocnienia ołowiu. Zgodnie z nowym warunkiem podobieństwa plastycznego współczynnik skali dla filii wynosi $C_{sr} = 173,32$, natomiast współczynnik podobieństwa $t_{sr} = 0,035$.

Nieco gorsze dopasowanie uzyskano dla mieszaniny filii z 8 % kaolinu oraz plasteliny z 10 % kaolinu, natomiast najgorsze dopasowanie uzyskano dla mieszaniny filii z 10 % lanoliny oraz czystej plasteliny. Naprężenie uplastyczniające dla mieszaniny filii z 10 % lanoliny po osiągnięciu maksymalnej wartości ulega silnemu osłabieniu inaczej niż dla ołowiu, dla którego naprężenie uplastyczniające po osiągnięciu wartości maksymalnej utrzymuje się prawie na stałym poziomie. Stąd też bardzo duża wartości współczynnika podobieństwa t_{sr} , który dla tej mieszaniny wyniósł 0,147.

ALUMINIUM UMOCNIONE

W przypadku aluminium postępowano podobnie jak dla ołowiu. Dla aluminium umocnionego charakteryzującego się niewielkim umocnieniem odkształceniowym ostatecznie jako materiał modelowy dobrano mieszaninę filii z 20 % kaolinu, dla której odpowiednie współczynniki wynosiły $t_{sr} = 0,042$ i $C_{sr} = 183,1$ (tab. 8.1.2). Na rys. 8.1.3 przedstawiono przebiegi naprężenia uplastyczniającego dla zastosowanej mieszaniny oraz aluminium umocnionego przy prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 8.1.3. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone w próbie spęczania dla mieszaniny filii z 20 % kaolinu oraz aluminium umocnionego przy prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$

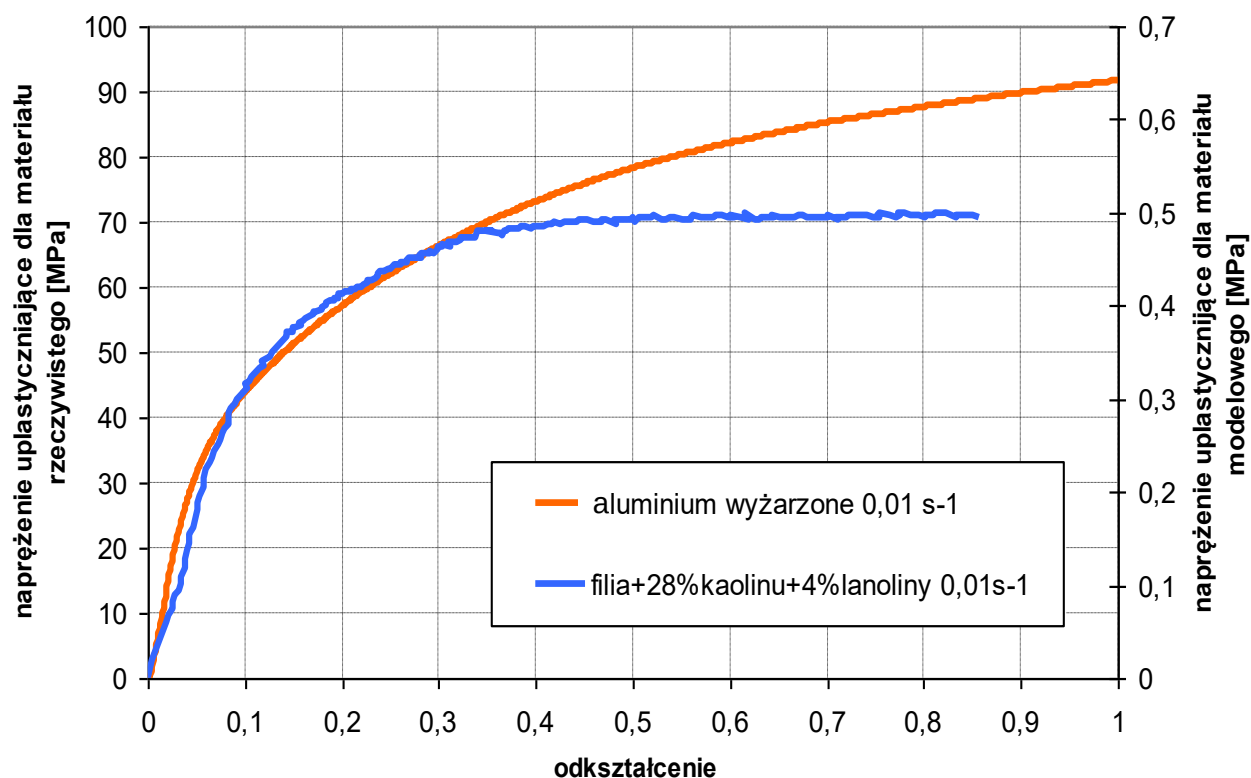
Tabela. 8.1.2. Wartości współczynników, t_{sr} i C_{sr} oraz skład chemiczny badanych materiałów modelowych zastosowanych do modelowania odkształcenia aluminium umocnionego

Skład chemiczny	t_{sr}	C_{sr}
filia	0,081	613,57
filia + 7 % lanoliny	0,154	957,96
filia + 8 % kaolinu	0,048	406,16
filia + 16 % kaolinu	0,113	224,87
plastelina +10 % kaolinu	0,057	200,76
filia + 20 % kaolinu	0,042	183,11

ALUMINIUM WYŻARZONE

W przypadku aluminium wyżarzonego, które posiada bardzo duże umocnienie odkształceniowe pojawił się problem doboru materiału modelowego. Badania nad materiałami modelowymi wykazały, że poprzez zwiększanie zawartości kaolinu można uzyskiwać mieszaniny o coraz większym umocnieniu odkształceniowym, jednakże dodatek kaolinu w ilości powyżej 20 % obniża odkształcenia graniczne i materiał taki szybciej ulega pęknięciu niż materiał rzeczywisty. Ponadto zwiększanie zawartości kaolinu jest ograniczone; przy zawartości tego napełniacza proszkowego powyżej 20 % całkowitego ciężaru materiału modelowego dochodzi do perkolacji, czyli do szepiania się cząstek modyfikatora. Perkolacja uniemożliwia właściwe wymieszanie, a tym samym odpowiednie rozmieszczenie cząstek napełniacza w osnowie materiału modelowego. Może to również wpływać na intensywność zjawiska sedymentacji, które powoduje anizotropię próbki materiału modelowego. Zmniejszenie zjawiska perkolacji oraz uzyskanie większych odkształceń granicznych w mieszaninach z dużą zawartością kaolinu możliwe jest poprzez wprowadzenie niewielkiej ilości lanoliny. Zostało to szczegółowo omówione w rozdziale 7.4.

Największe umocnienie odkształceniowe oraz odkształcenia graniczne odpowiadające materiałom rzeczywistym uzyskano dla mieszaniny złożonej z 68 % filii, 28 % kaolinu i 4 % lanoliny. Dla tej mieszaniny wyznaczono zgodnie z nowym warunkiem podobieństwa plastycznego współczynnik skali $C_{sr} = 130,72$ oraz współczynnik podobieństwa $t_{sr} = 0,069$. Stosunkowo wysoka wartość współczynnika podobieństwa świadczy o niezbyt dobrym dopasowaniu krzywej modelowej do materiału rzeczywistego. Na rys. 8.1.4 przedstawiono przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia dla zastosowanej mieszaniny oraz dla aluminium wyżarzonego dla prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$. Widoczne są na nim znaczne różnice w charakterze przebiegów obu krzywych zwłaszcza dla dużych odkształceń.



Rys. 8.1.4. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone w próbie spęczania dla mieszaniny filii z 28 % kaolinu i 8 % lanoliny oraz aluminium wyżarzonego przy prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$

Tabela. 8.1.3. Wartości współczynników, t_{sr} i C_{sr} oraz skład chemiczny badanych materiałów modelowych zastosowanych do modelowania odkształcania aluminium wyżarzonego

Skład chemiczny	t_{sr}	C_{sr}
filia	0,133	527,64
filia +8 % kaolinu	0,117	347,99
filia + 16 % kaolinu	0,114	190,75
plastelina +10 % kaolinu	0,176	169,37
filia + 20 % kaolinu	0,136	156,2
filia + 28 % kaolinu+ 4 % lanoliny	0,069	130,73

W tabeli 8.1.4 umieszczono następujące dane dotyczące badanych materiałów: skład chemiczny, wartości współczynników podobieństwa t_{sr} oraz współczynnika skali C_{sr} , dla prędkości odkształcania z zakresu $0,01-0,1 \text{ s}^{-1}$ oraz współczynnika czułości materiałów na prędkość odkształcania m_n , wyznaczonego ze wzoru (6.2.3), w porównaniu do wybranych materiałów rzeczywistych. Kolorem czerwonym wyszczególniono materiały modelowe, które ostatecznie wybrano do dalszych badań eksperymentalnych.

Tabela. 8.1.4. Wartości współczynników t_{sr} i C_{sr} oraz m_m a także skład chemiczny badanych materiałów modelowych zastosowanych do modelowania odkształcenia materiałów rzeczywistych: ołowiu, aluminium wyżarzonego i umocnionego

Współczynniki	t_{sr}	C_{sr}	m_m	t_{sr}	C_{sr}	m_m	t_{sr}	C_{sr}	m_m
MATERIAŁ	Ołów		0,08	Al wyżarzone		0,05	Al umocnione		0,04
Filia	0,035	173,32	0,09	0,133	527,64	0,09	0,081	613,57	0,09
Filia+10%lanoliny	0,147	309	0,11	0,261	964,73	0,11	0,15	1101,5	0,11
Filia+7%lanoliny	0,106	268,69	0,12	0,224	833,36	0,12	0,154	957,96	0,12
Filia+16%kaolinu	0,06	63,06	0,07	0,114	190,75	0,07	0,113	224,87	0,07
Filia+8%kaolinu	0,043	114,06	0,04	0,117	347,99	0,03	0,049	406,16	0,03
Filia+20%kaolinu	0,053	58,754	0,05	0,136	156,2	0,05	0,042	183,11	0,05
Filia +28%kaolinu+4%lanoliny	0,059	49,401	0,07	0,069	130,73	0,07	0,069	164,69	0,07
Plastelina	0,13	62,519	0,06	0,187	192,72	0,06	0,094	222,35	0,06
Plastelina+10%kaolinu	0,045	53,647	0,06	0,176	169,37	0,06	0,087	200,76	0,06

Z przedstawionych w tabeli wartości współczynników podobieństwa t_{sr} , wynika, że dla materiałów charakteryzujących się dużym umocnieniem (aluminium wyżarzone i umocnione) najlepsze dopasowanie wykazują krzywe modyfikowane napętniaczem proszkowym – kaolinem, który powoduje wzrost umocnienia i granicy plastyczności materiału modelowego. Należy jednak mieć na względzie, iż wraz ze wzrostem ich udziału objętościowego w miękkiej osnowie zmniejsza się ciągłość materiału, co może powodować jego pękanie podczas symulowanych procesów.

Natomiast dla ołowiu, czyli materiału z osłabieniem najlepiej dopasowanym materiałem modelowym jest czysta filia. Z kolei materiały modelowe na bazie filii z dodatkiem lanoliny lub czystej plasteliny osłabiają się zbyt intensywnie w porównaniu do krzywej umocnienia ołowiu, co sprawia, że wartości współczynnika podobieństwa t_{sr} są bardzo duże.

Z przedstawionej analizy doboru materiałów modelowych do rzeczywistych wynika, że wprowadzony przez autora współczynnik podobieństwa pozwala na ilościową ocenę dopasowania krzywych umocnienia i wybór najlepszego materiału modelowego.

8.2. Określenie warunków tribologicznych dla wybranych materiałów modelowych

Przy wyznaczeniu współczynników tarcia i doborze środka smarującego dla procesu modelowego, w celu zachowania podobieństwa z procesem rzeczywistym zastosowano próbę pierścieniową.

Badania przeprowadzono dla następujących materiałów modelowych, które były zastosowane do modelowania rzeczywistych procesów: filii, filii z 20% kaolinu oraz filii z 28 % kaolinu i 4 % lanoliny.

Do badań przygotowano próbki o wymiarach: średnica zewnętrzna 70 mm, średnica wewnętrzna 35 mm, wysokość 20 mm.

Na dokładność tej metody wpływa dokładność pomiarów próbki, przed i po eksperymencie. Dlatego dokonywano kilku pomiarów w różnych kierunkach a następnie wyznaczano wartość średnią dla danej wielkości. Ponadto każdą próbę powtarzano 3-krotnie. Badania przeprowadzono dla prób bez środka smarującego oraz z następującymi środkami smarującymi: wazeliną, olejem maszynowym, natomiast w celu zamodelowania tarcia przylgowego zastosowano papier ścierny. W celu lepszego smarowania na powierzchni próbek wykonano specjalne rowki, do których wprowadzany był środek smarujący. Wartości współczynnika tarcia oraz podstawowe wymiary próbek przedstawiono w tabelach poniżej.

Tabela. 8.2.1. Wyniki badań współczynnika tarcia filii

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100%	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100%	μ
bez smaru	35,0	34,3	2	20	15	25	0,11
wazelina	34,8	35,0	-0,574	20	15	25	0,050
papier ścierny	34,4	30,0	12,8	20	15	25	0,25
olej maszynowy	34,4	34	1,1	20	15	25	0,07

Tabela. 8.2.2. Wyniki badań współczynnika tarcia filii + 20 % kaolinu

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100%	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100%	μ
bez smaru	35,0	34,2	2,28	20	15	25	0,11
wazelina	34,7	35,1	-1,15	20	15	25	0,050
papier ścierny	34,4	30,5	11,34	20	15	25	0,25
olej maszynowy	34,4	33,9	1,45	20	15	25	0,07

Tabela. 8.2.3. Wyniki badań współczynnika tarcia filii + 28 % kaolinu+8 % lanoliny

Rodzaj środka smarnego	D_p	D_k	$\Delta D/D_p$ 100%	H_p	H_k	$\Delta H/H_p$ 100%	μ
bez smaru	35,0	34,3	2	20	15	25	0,11
wazelina	34,8	34,9	-0,2	20	15	25	0,050
papier ścierny	34,4	29,9	13,08	20	15	25	0,2
olej maszynowy	34,4	34,1	0,87	20	15	25	0,07

gdzie:

D_p – średnica wewnętrzna początkowa,

D_k – średnica wewnętrzna końcowa,

H_p – wysokość początkowa,

H_k – wysokość końcowa,

$\Delta D = (D_p - D_k)$

$\Delta H = (H_p - H_k)$

μ - współczynnik tarcia odczytany z wykresu na rys 2.5.1.5.

Dla wszystkich materiałów modelowych uzyskano zbliżone współczynniki tarcia zależne jedynie od środka smarującego.

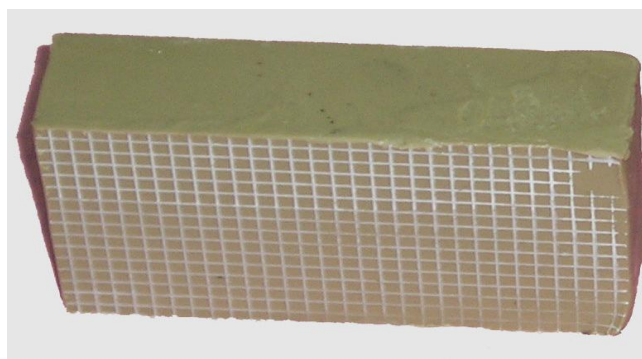
9. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW KSZTAŁTOWANIA PLASTYCZNEGO PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW MODELOWYCH

W celu zbadania możliwości zastosowania nowego opisu warunku podobieństwa plastycznego w modelowaniu fizycznym przeprowadzone zostało modelowanie fizyczne dwóch wybranych procesów obróbki plastycznej: wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia oraz osiowosymetrycznego wyciskania przeciwbieżnego.

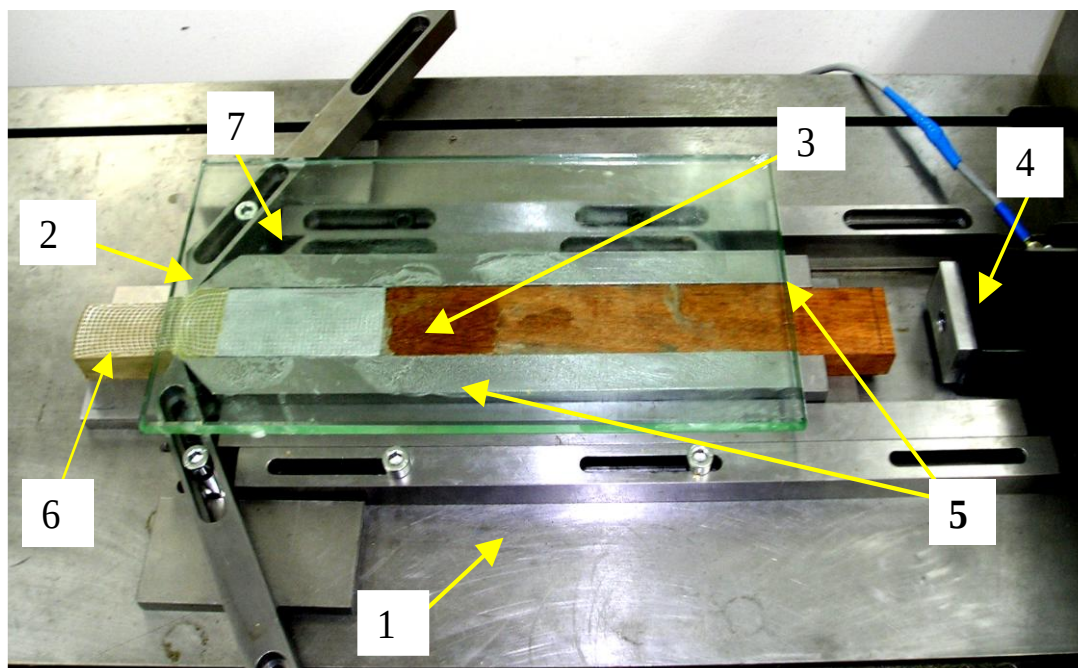
Sprawdzono ponadto, czy istnieje możliwość oceny poprawności uzyskanych wyników z modelowania fizycznego na podstawie wartości współczynnika podobieństwa t_{sr} .

9.1. Modelowanie fizyczne procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Proces fizyczny wyciskania współbieżnego przeprowadzano przy temperaturze 22 °C oraz dla prędkości liniowej stempla 0,12 mm/s, co opowiadało średniej prędkości odkształcania $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Model fizyczny został wykonany w skali 1:1 w stosunku do procesu rzeczywistego. Schemat analizowanego procesu przedstawiono na rys. 6.1.1, a na rys. 9.1.1 próbkę stosowaną w badaniach. Natomiast na rys. 9.1.2 pokazano zdjęcie stanowiska do modelowania fizycznego tego procesu, które zbudowane jest z: głównej płyty stołowej (1), na której zamontowana jest matryca (2) oraz ruchomy stempel (3) wraz z prowadnicami (5), do którego podłączony jest czujnik siły (4). Proces wyciskania próbek z materiałów modelowych (6) realizowany na tym urządzeniu był rejestrowany poprzez szynę (7) za pomocą aparatu cyfrowego.



Rys. 9.1.1. Próbkę stosowana w badaniach wykonana z materiału modelowego



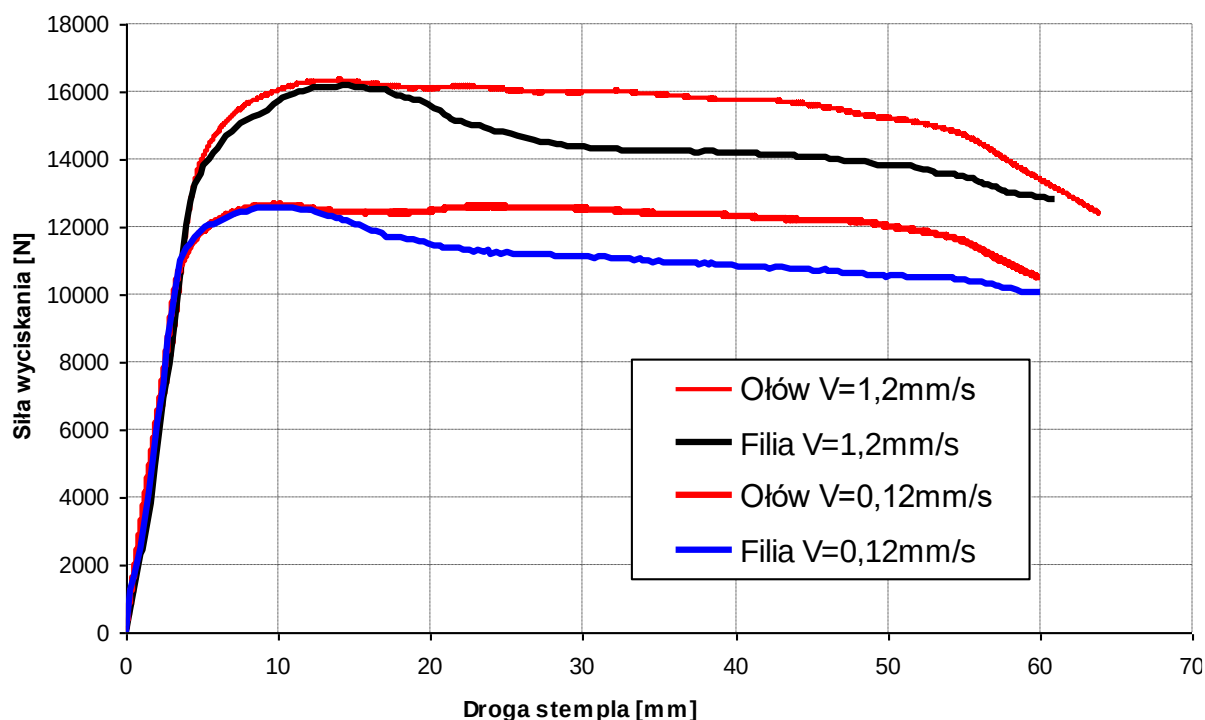
Rys. 9.1.2. Zdjęcie stanowiska do modelowania fizycznego procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

Proces wyciskania współbieżnego został celowo przeprowadzony dla trzech materiałów: ołowiu, aluminium umocnionego i wyżarzonego, których krzywe umocnienia mają różny charakter. Krzywe te przedstawiono na rys. 6.2.8.

Na powierzchni próbki naniesiona została kwadratowa siatka koordynacyjna o boku 2,5 mm, która służyła do wyznaczania rozkładu odkształceń. Podczas procesu wyciskania poprzez szybę rejestrowana była deformacja tej siatki za pomocą aparatu cyfrowego. W celu zachowania podobieństwa warunków tribologicznych, przeprowadzono szczegółowe badania dotyczące doboru takich środków smarujących, aby w modelu fizycznym i procesie rzeczywistym uzyskać podobny współczynnik tarcia (rozdz. 8.2). W procesie rzeczywistym jako smar zastosowano: dla ołowiu olej maszynowy, dla którego współczynnik tarcia μ wynosił 0,055, zaś dla obu rodzajów aluminium stearynian magnezu, dla których μ wynosił 0,05. Natomiast w modelu fizycznym zastosowano wazelinę, która była umieszczana w specjalnie wykonanych rowkach na powierzchni próbek, dla takich warunków uzyskano współczynnik tarcia μ , który wynosił 0,05.

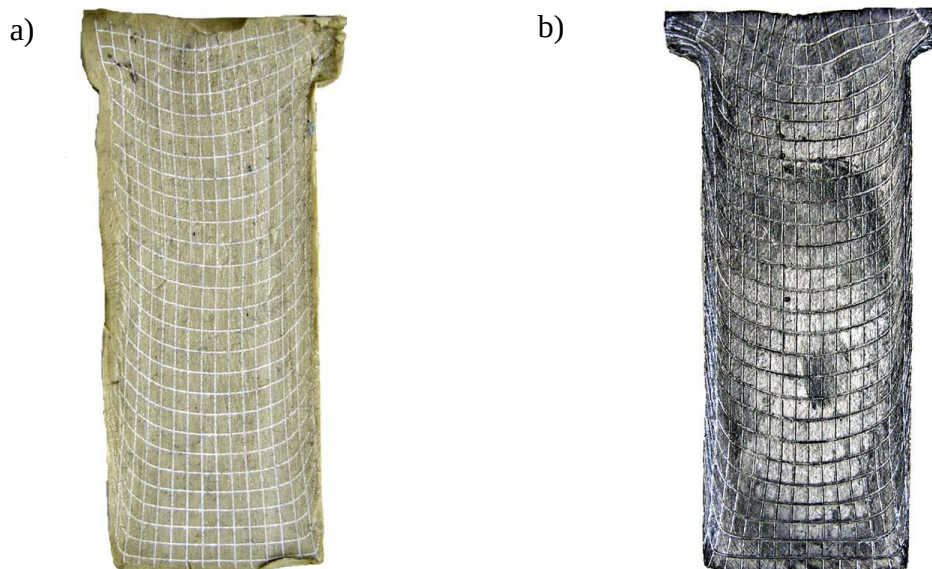
W procesach modelowych podobnie jak w rzeczywistych rejestrowano siłę wyciskania w funkcji drogi stempla. W celu porównania obu przebiegów wyniki otrzymane z modelowania fizycznego zostały przeliczone na proces rzeczywisty poprzez

przemnożenie ich przez współczynnik skali $C_{\dot{\epsilon}}$. Na rys. 9.1.3 przedstawiono przebiegi siły wyciskania ołowiu uzyskane z modelowania fizycznego po odpowiedniej transformacji dla różnych prędkości stempla.



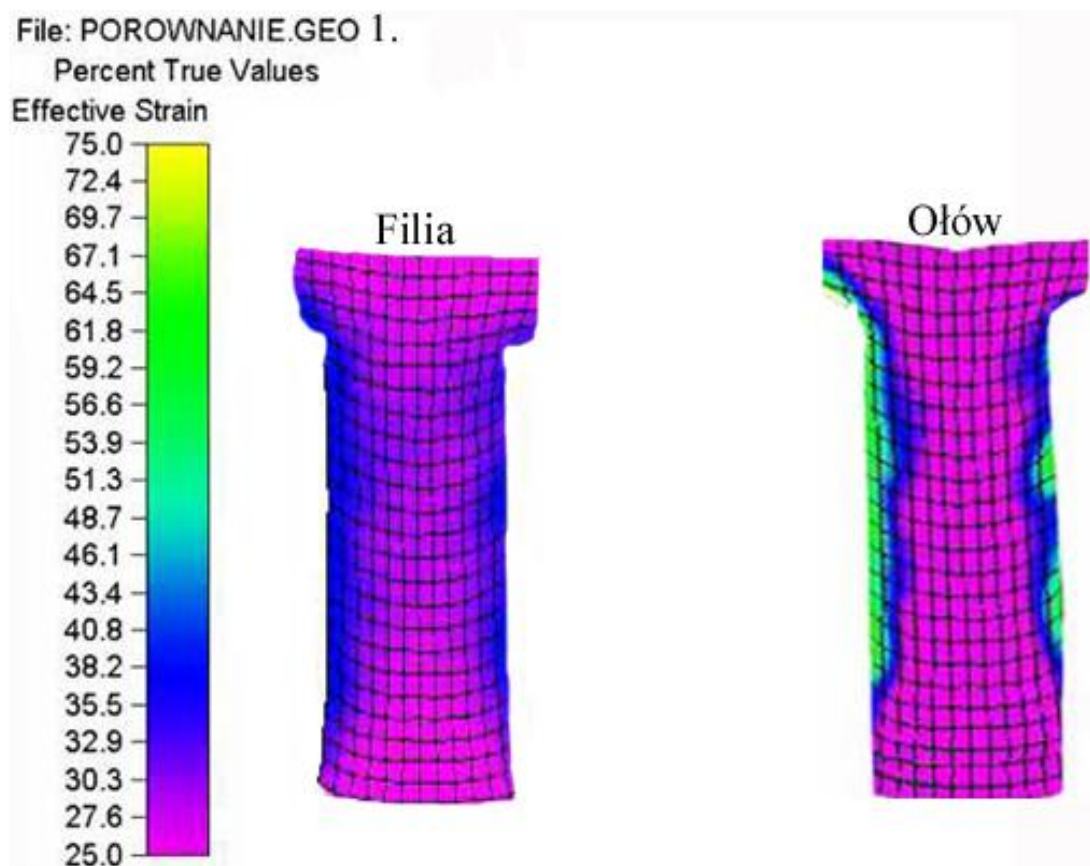
Rys. 9.1.3. Przebiegi siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla ołowiu i modelu fizycznego po odpowiedniej transformacji dla różnych prędkościach stempla

W początkowej fazie wyciskania uzyskano bardzo zbliżone przebiegi sił wyciskania dla modelu fizycznego i procesu rzeczywistego, natomiast w zakresie stanu ustalonego wyciskania dla modelu fizycznego uzyskano nieznacznie mniejsze siły. Te różnice można tłumaczyć mniejszym współczynnikiem przewodzenia ciepła materiałów modelowych niż rzeczywistych, co prowadziło do szybkiego wzrostu temperatury w strefach najmocniej odkształconych i spadku naprężenia uplastyczniającego. W następstwie tego tworzyła się większa strefa martwa w materiałach modelowych, co z kolei mogło powodować zmniejszenie powierzchni tarcia, a tym samym również obniżenie siły wyciskania. Pomimo tych niewielkich różnic w przebiegu sił materiały modelowy i ołów odkształcały się podobnie, o czym świadczą niemal identycznie odkształcone siatki koordynacyjne (rys. 9.1.4).



Rys. 9.1.4. Odształcona siatka koordynacyjna naniesiona na próbki: a) dla filii oraz b) dla ołowiu

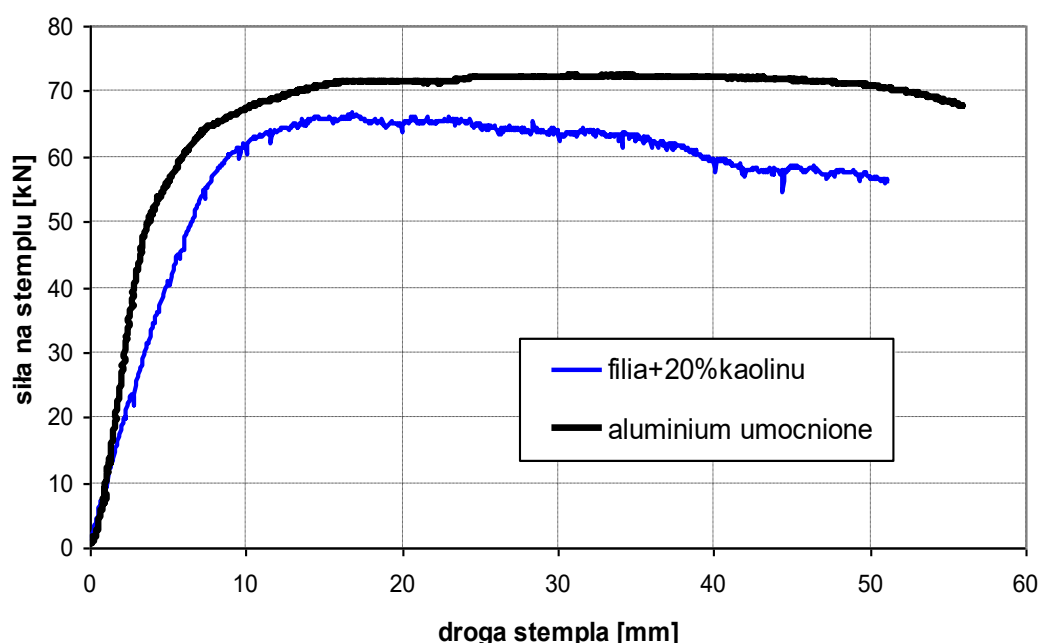
W celu pełniejszej analizy oceny podobieństwa sposobu płynięcia materiału w procesie fizycznym oraz rzeczywistym, wyznaczono rozkłady odkształceń dla obu materiałów za pomocą specjalnego systemu do analizy obrazu ASAME. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 9.1.5.



Rys. 9.1.5. Rozkłady zastępczego odkształcenia dla mieszaniny filii oraz dla ołowiu uzyskane za pomocą programu ASAME

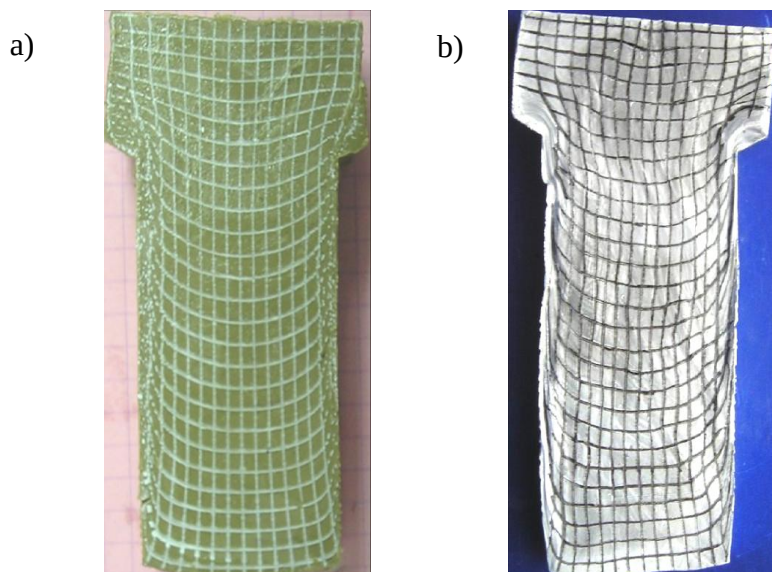
Uzyskano duże podobieństwo w rozkładzie odkształcenia zastępczego dla ołowiu i filii. Potwierdza to także bardzo mała wartość współczynnika podobieństwa wynosząca $t_{sr} = 0,035$, wyznaczona w oparciu o nowy warunek podobieństwa plastycznego.

Do modelowania fizycznego wyciskania aluminium umocnionego zastosowano mieszaninę złożoną z 80 % filii i 20 % kaolinu, dla której współczynnik podobieństwa t_{sr} wyniósł 0,42. Charakter przebiegu siły uzyskany z modelu fizycznego po odpowiedniej transformacji jest podobny do przebiegu uzyskanego w procesie rzeczywistym. Natomiast poziom siły w procesie modelowym jest o około 10 % niższy niż w procesie rzeczywistym (rys. 9.1.6). Może to wynikać z niewielkich różnic w kształcie krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego, odmiennych warunków tarcia panujących w obu procesach- w materiałach modelowych występowały wielokrotnie mniejsze naciski- oraz większej strefy martwej w obrębie matrycy w materiałach modelowych niż dla materiałów rzeczywistych.



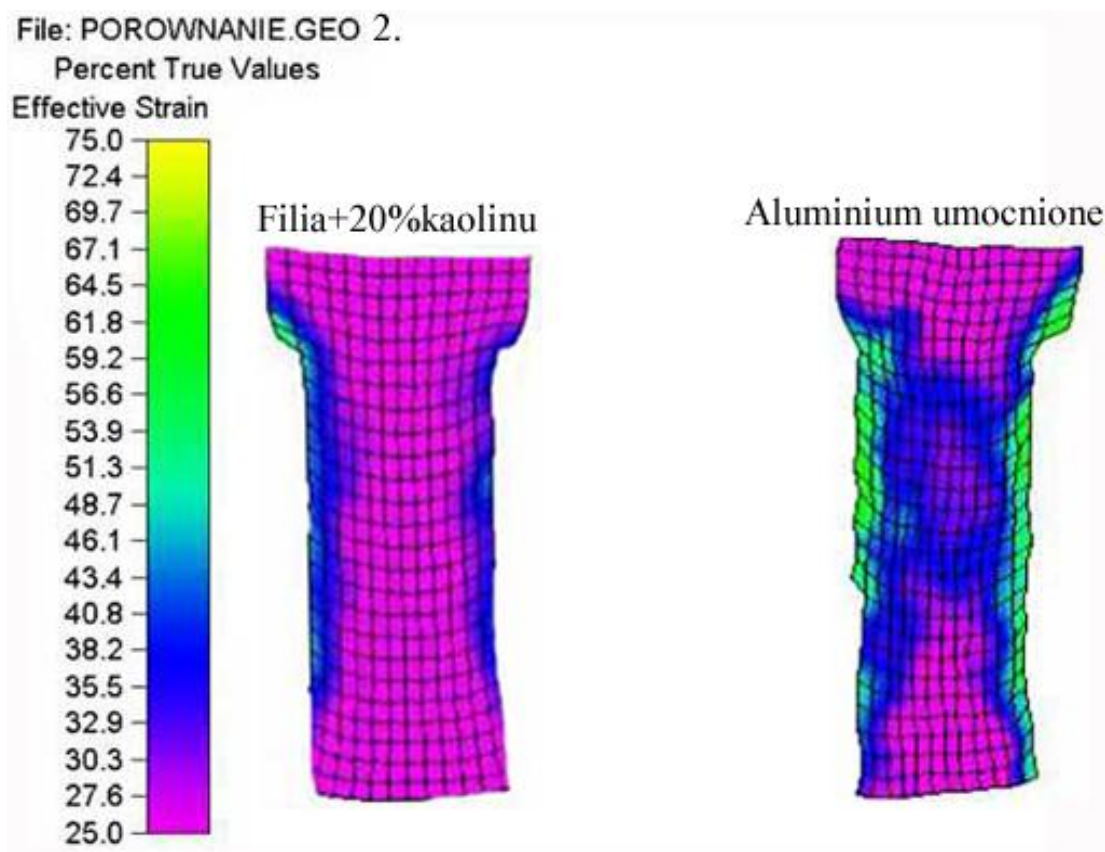
Rys. 9.1.6. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla aluminium umocnionego oraz uzyskany z modelu fizycznego po odpowiedniej transformacji

W modelu fizycznym sposób odkształcania materiału był bardzo zbliżony do sposobu płynięcia rzeczywistego materiału (rys. 9.1.7). Potwierdza to również rozkład odkształcenia zastępczego dla tej pary materiałów uzyskany przy użyciu programu ASAME przedstawiony na rys. 9.1.8.



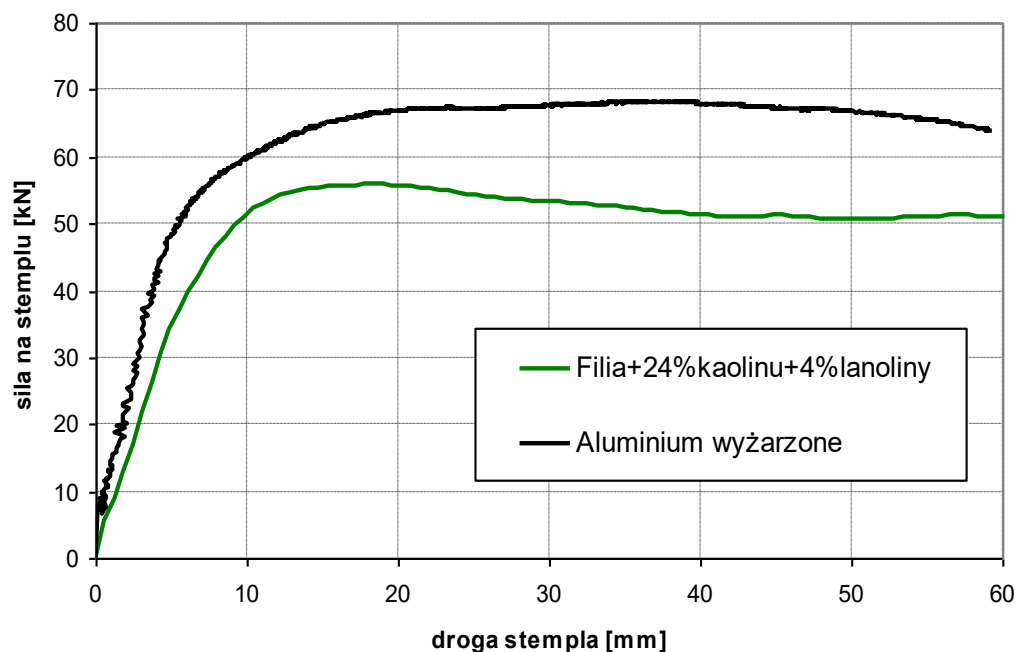
Rys. 9.1.7. Odształcona siatka koordynacyjna naniesiona na próbki: a) dla mieszaniny filii z 20 % kaolinu oraz b) dla aluminium umocnionego

Porównując wyniki uzyskane dla modelowania wyciskania ołowiu, gdzie współczynnik podobieństwa wynosił $t_{sr} = 0,035$ z wynikami modelowania wyciskania aluminium umocnionego gdzie współczynnik podobieństwa wynosił $t_{sr} = 0,042$ można zauważyć, że w pierwszym przypadku model fizyczny jest znacznie bliższy procesowi rzeczywistemu.

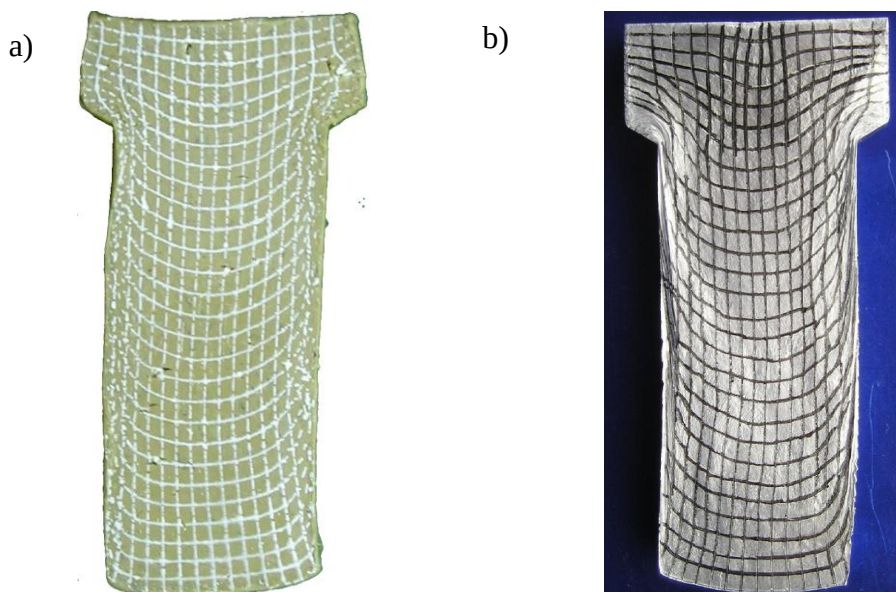


Rys. 9.1.8. Rozkłady zastępczego odkształcenia dla mieszaniny filii z 20% kaolinu oraz dla aluminium umocnionego

Do modelowania wyciskania aluminium wyżarzonego zastosowano mieszaninę filii z 24 % kaolinu i 4 % lanoliny. W tym przypadku zarówno przebieg siły jak i odkształcenie siatki koordynacyjnej dla procesu fizycznego znacznie odbiegają od procesu rzeczywistego (rys 9.1.9 i 9.1.10). Wyników tych można się było spodziewać gdyż współczynnika podobieństwa miał najwyższą wartość ze wszystkich badanych par materiałów i wynosił $t_{sr} = 0,069$.



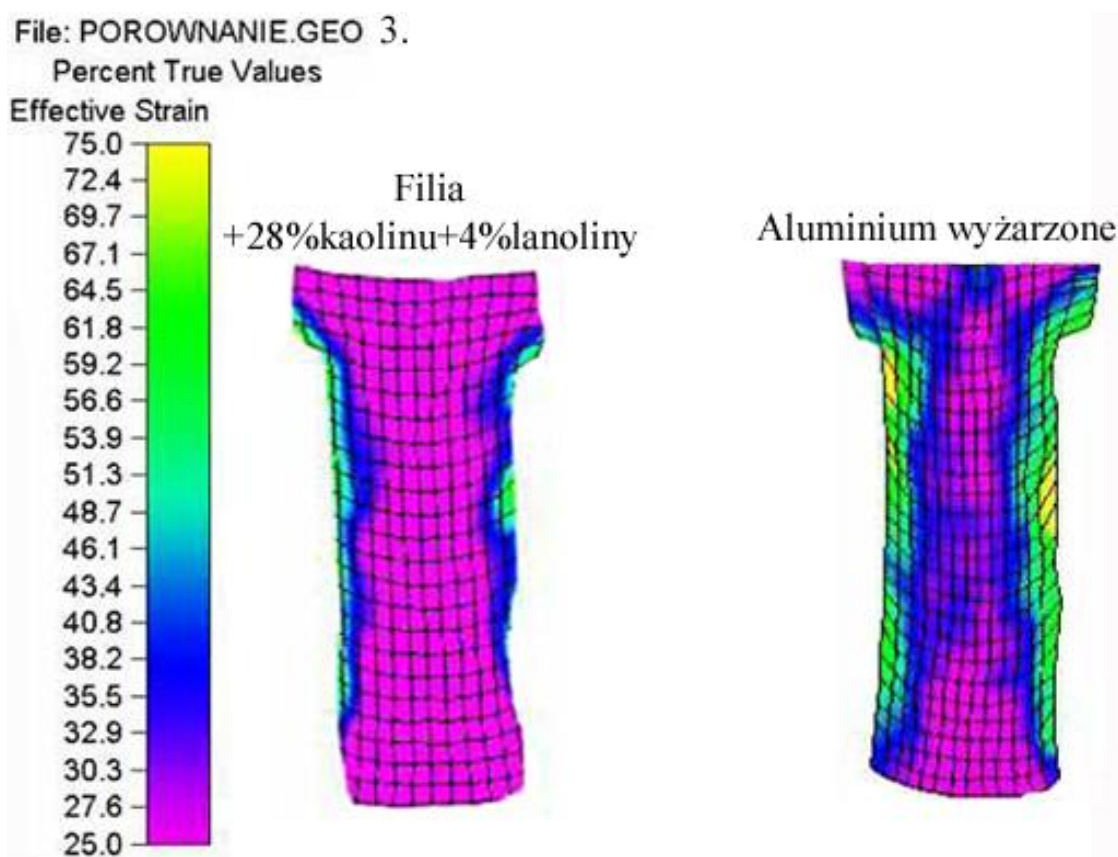
Rys. 9.1.9. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla aluminium wyżarzonego oraz uzyskany z modelu fizycznego po odpowiedniej transformacji



Rys. 9.1.10. Odkształcona siatka koordynacyjna naniesiona na próbki: a) dla materiału modelowego oraz b) dla aluminium wyżarzonego

Dodatkowo materiał modelowy wykazywał pęknięcia w miejscach największych odkształceń. Pomimo intensywnych prób doboru materiału modelowego dla aluminium wyżarzonego nie udało się znaleźć odpowiedniej mieszanki wosków, która poprawnie odzwierciedlałaby zachowanie się materiału rzeczywistego podczas odkształcania plastycznego.

Także uzyskany rozkład odkształcenia zastępczego z programu ASAME dla pary materiałów aluminium wyżarzonego oraz mieszanki filii z 28 % kaolinu i 4 % lanoliny (rys. 9.1.11) wykazuje największe różnice w odniesieniu do poprzednich par materiałów.



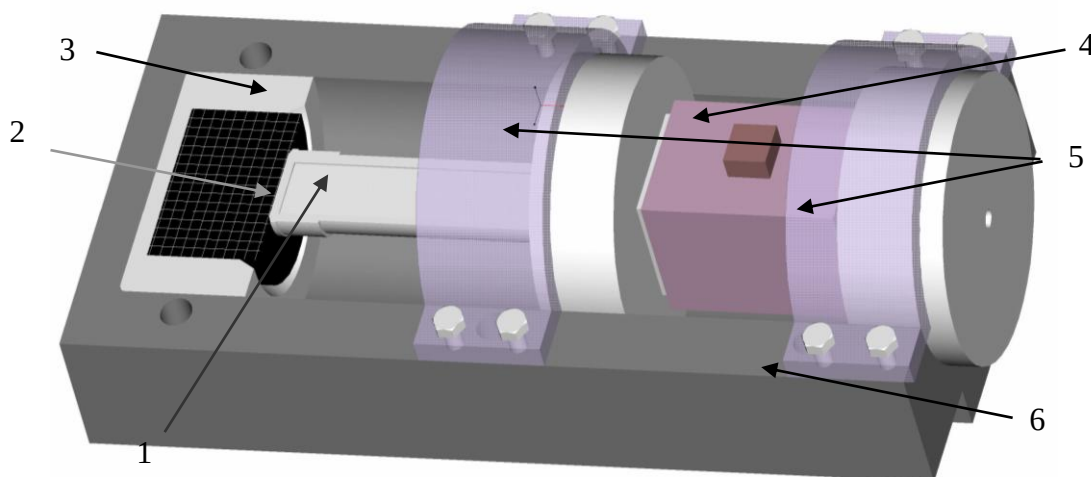
Rys. 9.1.11. Rozkłady zastępczego odkształcenia dla mieszanki filii z 24 % kaolinu i 4 %lanoliny oraz dla aluminium wyżarzonego

Należy zaznaczyć, że największe rozbieżności w rozkładach odkształceń dla poszczególnych par materiałów znajdują się w obszarach silnie odkształconych, gdzie występuje bardzo duża deformacja siatki koordynacyjnej. Różnice te mogą wynikać z uszkodzeń siatek w tych obszarach, co z kolei utrudniało interpretację siatek przy użyciu systemu do analizy obrazu ASAME.

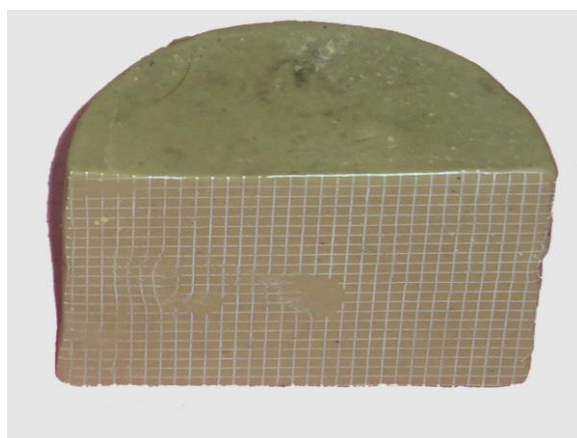
9.2. Modelowanie fizyczne osiowosymetrycznego procesu wyciskania przeciwbieżnego

Proces fizyczny wyciskania przeciwbieżnego przeprowadzono w takich samych warunkach, co proces rzeczywisty. Prędkości stempla w procesie rzeczywistym i modelowym zostały tak dobrane, aby uzyskać średnią prędkość odkształcenia materiału wynoszącą $0,01 \text{ s}^{-1}$. Dodatkowo w celu uzyskania większej dokładności wyników, model fizyczny został zrealizowany w skali 2:1 w matrycy o średnicy $d = 80 \text{ mm}$, wysokości $h = 52 \text{ mm}$ i promieniu przejścia dna w pobocznice $r = 6 \text{ mm}$ przy użyciu stempla o średnicy $d_s = 40 \text{ mm}$, długości części roboczej $h_s = 24 \text{ mm}$ i sfazowaniu $2-45^\circ$.

Na rys. 9.2.1 przedstawiono schemat modelu fizycznego tego procesu wykonany w programie Pro/Engineer, natomiast na rys. 9.2.3 zdjęcie całego stanowiska.

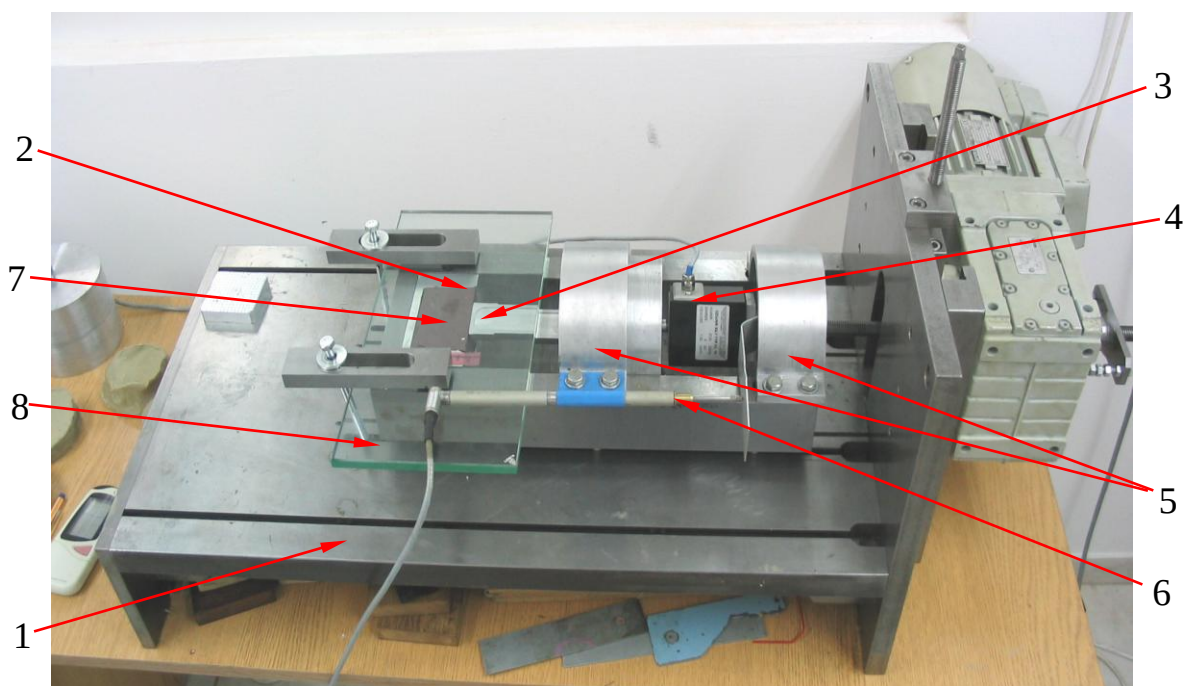


Rys. 9.2.1 Schemat modelu fizycznego analizowanego procesu wyciskania: 1 – stempel, 2 – próbka, 3 –matryca, 4 – czujnik siły, 5 – tuleje prowadzące, 6 – pojemnik



Rys. 9.2.2. Próbką z materiału modelowego stosowana do badań w procesie wyciskania przeciwbieżnego

W celu zapewnienia możliwości pomiaru odkształceń wykorzystano fakt, że proces jest osiowosymetryczny i w modelu fizycznym zastosowano próbki w postaci połowy walca (rys. 9.2.2). Na powierzchni symetrii naniesiona została kwadratowa siatka o długości boku 2,5 mm przy pomocy sitodruku. Podczas procesu wyciskania poprzez szybę rejestrowana była deformacja tej siatki za pomocą aparatu cyfrowego.



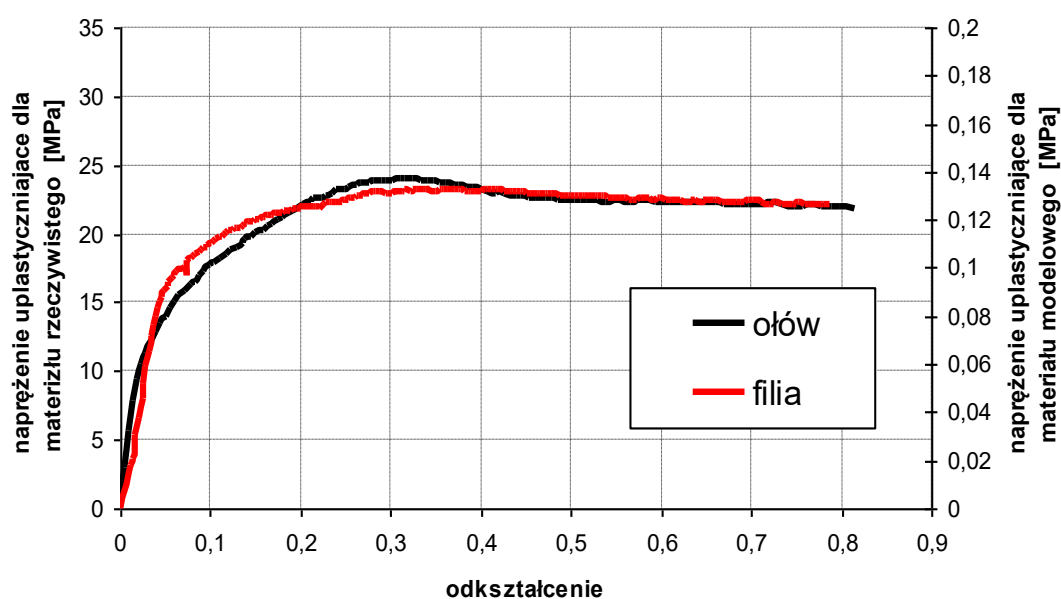
Rys. 9.2.3. Zdjęcie stanowiska do modelowania fizycznego procesu wyciskania przeciwbieżnego

Stanowisko do odkształcania zbudowane jest z: głównej płyty stołowej (1), na której zamontowana jest matryca (2) oraz ruchomy stempel wraz z prowadnicą (3), do którego jest zamontowany czujnik siły (4). Osiowy przesuw stempla zapewniają tuleje prowadzące (5) połączone z czujnikiem indukcyjnym przemieszczenia (6). Na zdjęciu przedstawiono również gotową do odkształcania próbkę (7) oraz szybę (8), przymocowaną do stołu za pomocą łapek, przez którą rejestrowany był proces wyciskania za pomocą aparatu cyfrowego. Po prawej stronie umieszczono układ napędowy: silnik o mocy 1 kW wraz z motoreduktorem firmy LENZE oraz mechanizm śruby - nakrętka zamieniający ruch obrotowy silnika na ruch posuwisty stempla. Maksymalna siła kształtowania w przedstawionym stanowisku wynosi 7 kN.

Wszystkie testy były przeprowadzane przy temperaturze 22 °C. Zarówno w procesie rzeczywistym, jak i w modelu fizycznym rejestrowana była siła wyciskania w funkcji drogi stempla.

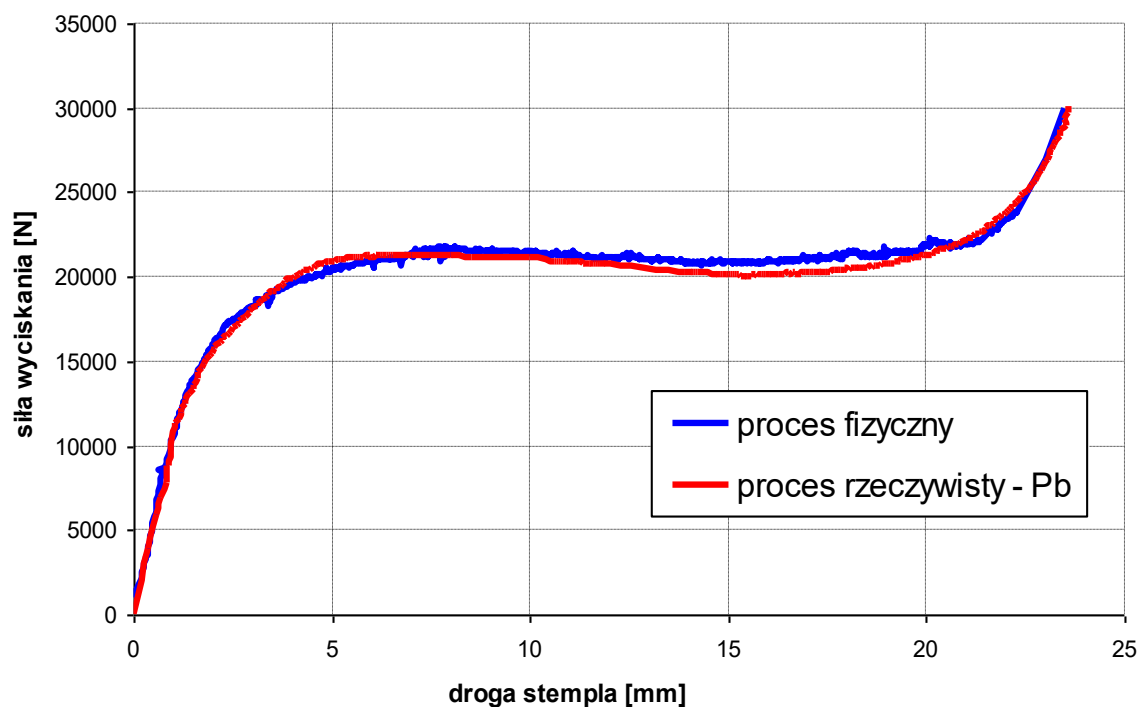
Siły tarcia, które występują między materiałem modelowym i rzeczywistym a narzędziem są bardzo ważne dla przebiegu całego procesu. Dotyczy to zarówno kierunku płynięcia materiału, a zatem jego deformacji i rozkładu odkształceń, jak również pojawienia się stref martwych. Przeprowadzono więc szczegółowe badania, w celu dobrania takich środków smarujących, aby w modelu fizycznym i procesie rzeczywistym uzyskać podobny współczynnik tarcia. Współczynniki tarcia zostały wyznaczone w próbie pierścieniowej. W procesie rzeczywistym zastosowano olej maszynowy, dla takich warunków współczynnik tarcia μ wynosił 0,055. W modelu fizycznym natomiast zastosowano wazelinę, która była umieszczana w specjalnie wykonanych rowkach na powierzchni próbek, dla takich warunków współczynnik tarcia μ wynosił 0,05.

W celu dobrania odpowiedniego materiału modelowego, który zachowywałby się podobnie jak ołów, podczas odkształcania przebadano różne mieszaniny i rezultaty tych badań przedstawiono w rozdziale 7. Ostatecznie jako materiał modelowy do omawianego procesu wybrano czystą filię, gdyż krzywa umocnienia tego materiału najlepiej odpowiadała charakterowi krzywej umocnienia ołowiu. Zgodnie z nowym warunkiem podobieństwa plastycznego, który został omówiony szczegółowo w rozdziale 5.1 dla tego materiału modelowego współczynnik skali wynosi $C_{sr} = 173,32$ natomiast współczynnik podobieństwa $t_{sr} = 0,035$. Bardzo mała wartość współczynnika podobieństwa świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu krzywej umocnienia filii do krzywej umocnienia ołowiu. Na rys. 9.2.4 przedstawiono przebiegi naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia dla filii oraz dla ołowiu dla prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 9.2.4. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie wyznaczone w próbie spęczania dla filii oraz dla ołowiu dla prędkości odkształcania $0,01 \text{ s}^{-1}$

W procesie modelowym podobnie jak w rzeczywistym rejestrowana była siła wyciskania w funkcji drogi stempla. W celu porównania obu przebiegów wyniki otrzymane z modelowania fizycznego zostały przeliczone na proces rzeczywisty z uwzględnieniem współczynnika skali C_{sr} . Otrzymany przebieg z modelowania fizycznego jest bardzo zbliżony do przebiegu w procesie rzeczywistym (rys. 9.2.5).

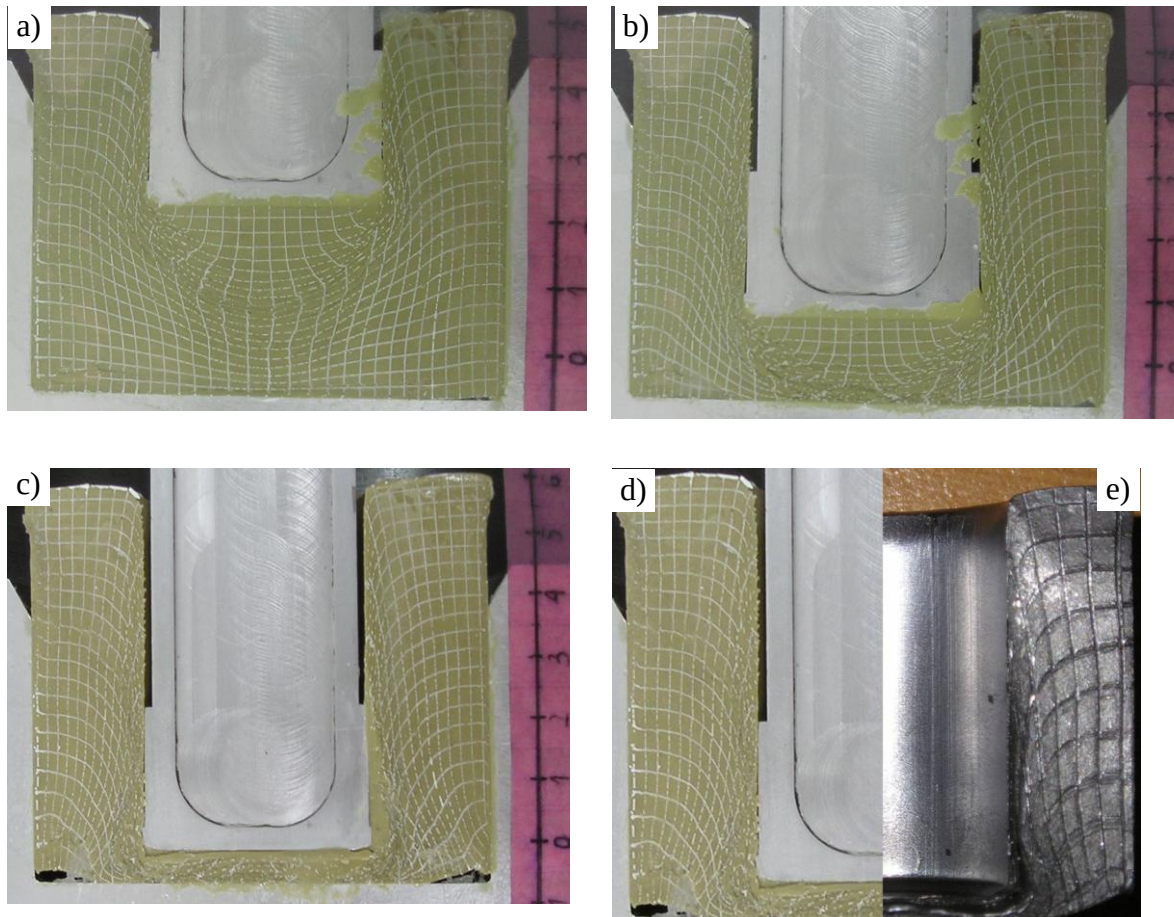


Rys. 9.2.5. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego oraz uzyskany z modelu fizycznego po odpowiedniej transformacji

Uzyskane przebiegi w procesie rzeczywistym i w modelu fizycznym można, jak to już wcześniej wspomniano, podzielić na trzy zakresy. W pierwszym następuje szybki wzrost siły wyciskania, związany z redukcją przekroju poprzecznego wyciskanego materiału, pokonaniem sił tarcia oraz umacnianiem się materiału. Drugi zakres dotyczy natomiast zasadniczego procesu wyciskania, gdy materiał wypływa z pojemnika. Wówczas siła wyciskania ulega nieznacznemu obniżeniu. Spadek tej siły jest spowodowany tym, że na krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego dla odkształceń większych od 0,3 występuje zmniejszenie naprężenia uplastyczniającego spowodowane osłabieniem materiału typowym dla materiałów odkształczanych na gorąco. W końcowym etapie wyciskania przeciwbieżnego następuje gwałtowny wzrost siły związany ze zwiększeniem sił tarcia na powierzchni czołowej stempla i na powierzchni dna matrycy.

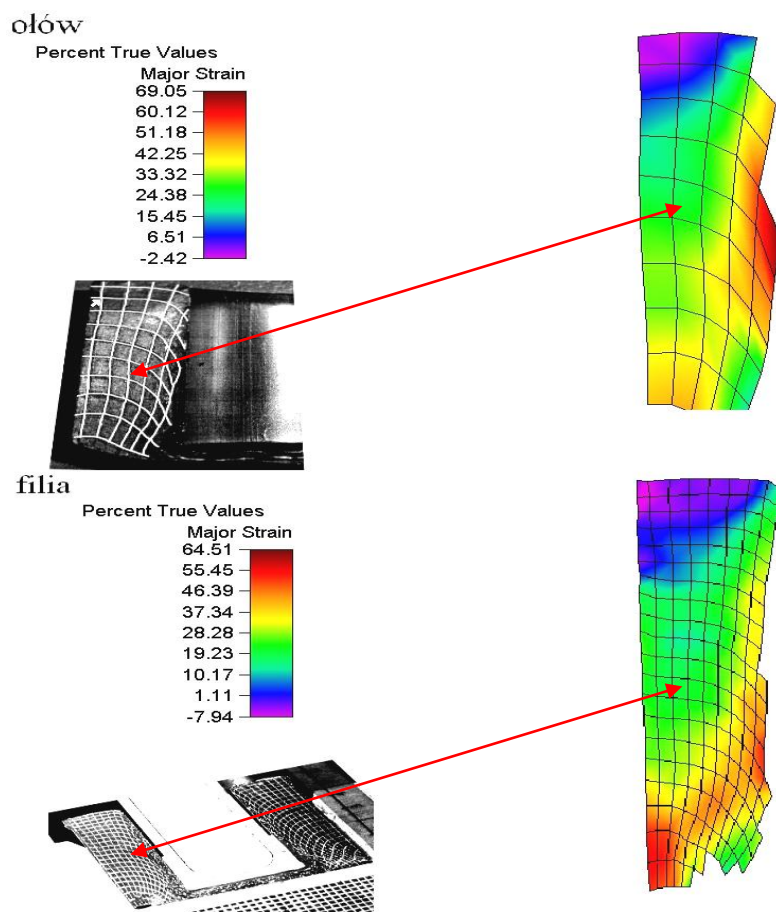
Na rys. 9.2.6 przedstawiono zdjęcia odkształconych próbek z materiału modelowego dla różnych zagłębień stempla. W wyniku oddziaływania oporów tarcia, w procesie wyciskania

występują strefy o różnym stopniu odkształcenia. W obszarze przylegającym do czoła stempla tworzy się bardzo szybko stożkowa strefa martwa, w której zachodzą małe odkształcenia podobnie jak w rzeczywistym procesie. Wyciśnięcie materiału z tego obszaru wymaga bardzo dużych sił. Obszary zewnętrzne próbki przylegające do powierzchni pojemnika są mało odkształcone.

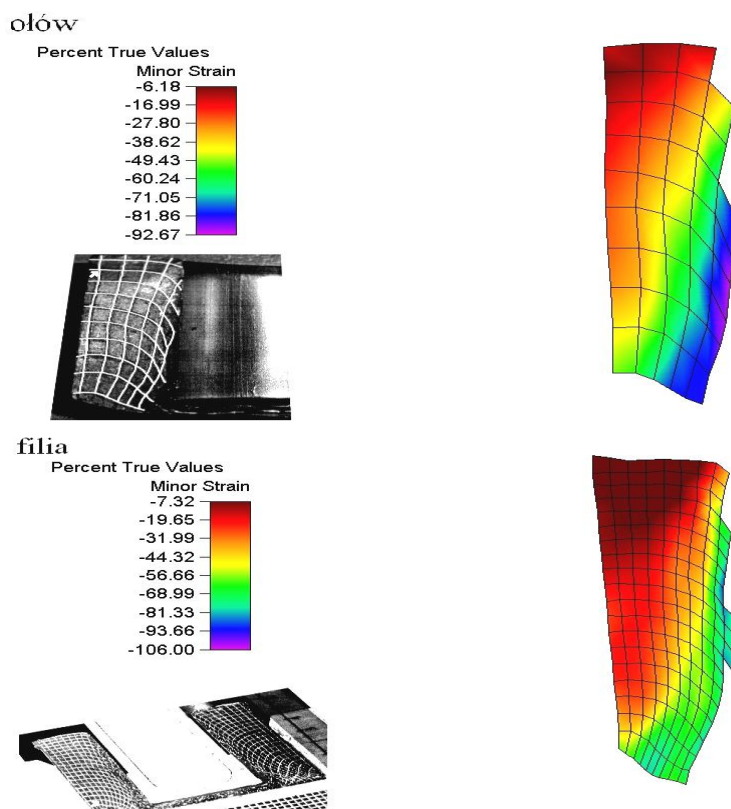


Rys. 9.2.6. Odkształcone próbki z materiału modelowego dla różnych zagłębień stempla: a) do 22 mm, b) do 36 mm, c) do 49 mm, d) porównanie połowy odkształconej próbki z filii do odkształconej próbki z ołowiu przy całkowitym zagłębieniu stempla

Podobnie jak w przypadku procesu wyciskania współbieżnego w celu pełniejszej analizy deformacji materiału podczas odkształcania, dokonano porównania sposobu płynięcia filii w procesie fizycznym oraz ołowiu w procesie rzeczywistym za pomocą specjalnego systemu do analizy obrazu ASAME. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 9.2.7 i 9.2.8.



Rys. 9.2.7. Rozkłady największego odkształcenia głównego dla przeciwbieżnego wyciskania osiowosymetrycznego ołowiu i filii



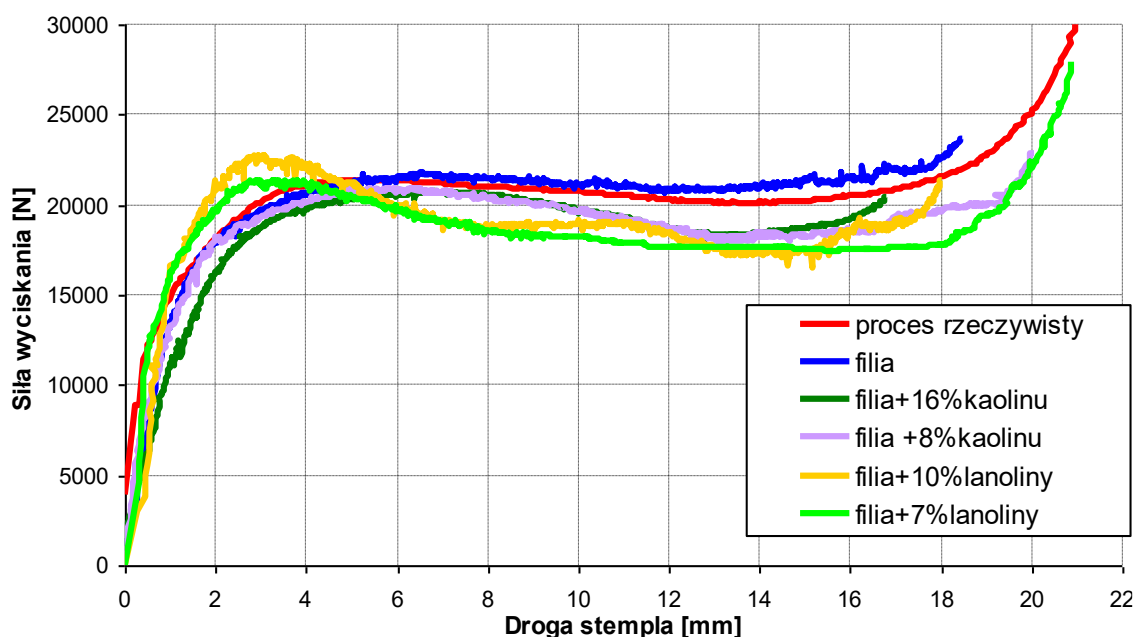
Rys. 9.2.8. Rozkłady najmniejszego odkształcenia głównego dla przeciwbieżnego wyciskania osiowosymetrycznego ołowiu i filii

Uzyskano duże podobieństwo rozkładów odkształceń filii i ołowiu, co potwierdza, że materiał modelowy dość dobrze spełnia warunek podobieństwa plastycznego. Wynika stąd, że na podstawie wartości współczynnika t_{sr} możliwa jest predykcja wyników modelowania fizycznego. Niewielkie różnice występują jedynie w obszarach silnie odkształconych, gdzie występuje bardzo duża deformacja siatki koordynacyjnej, co utrudniało ich dokładną interpretację przez system do analizy obrazu.

Przeprowadzone modelowanie fizyczne procesu wyciskania przeciwbieżnego ołowiu wykazało, że metodą tą można nie tylko bardzo dobrze modelować sposób płynięcia materiału rzeczywistego, ale również wyznaczać parametry siłowe.

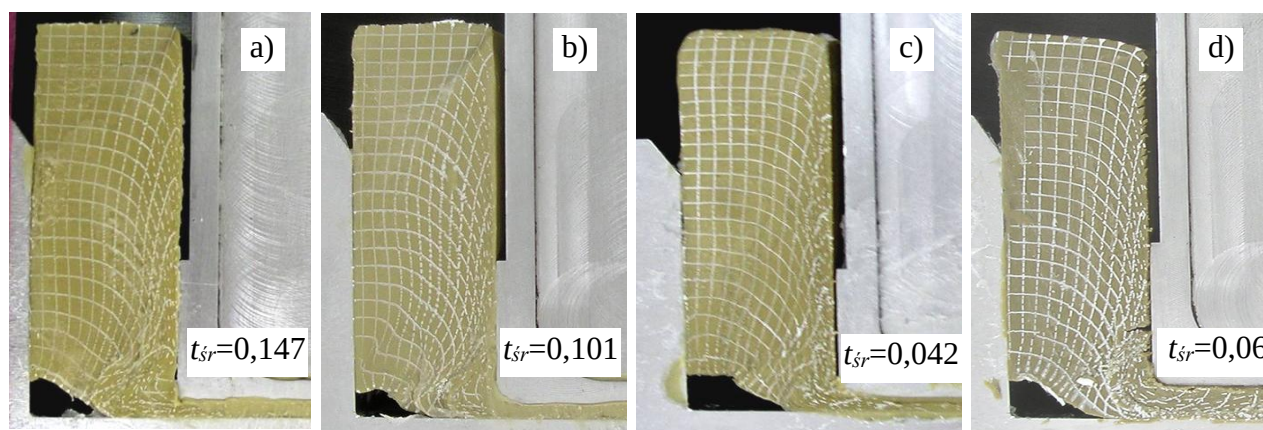
Dla osiowosymetrycznego wyciskania przeciwbieżnego ołowiu uzyskano bardzo dużą zgodność pomiędzy procesem rzeczywistym a modelem fizycznym tego procesu, gdyż warunek podobieństwa plastycznego został bardzo dokładnie spełniony.

W celu sprawdzenia, czy na podstawie wartości współczynnika podobieństwa t_{sr} w zaproponowanym warunku podobieństwa plastycznego można oceniać dokładność modelu fizycznego, przeprowadzono również modelowanie fizyczne procesu wyciskania przeciwbieżnego dla innych materiałów modelowych, których krzywe przedstawiono na rys. 8.1.1. Uzyskane przebiegi siły wyciskania w funkcji drogi stempla po przeliczeniu na proces rzeczywisty z uwzględnieniem współczynnika skali C_{sr} przedstawiono na rys. 9.2.9. Na rys. 9.2.10 przedstawiono natomiast zdjęcia odkształconych próbek z siatkami koordynacyjnymi dla zastosowanych materiałów modelowych.



Rys. 9.2.9. Przebiegi siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego oraz uzyskane z modelu fizycznego dla wybranych materiałów modelowych po odpowiedniej transformacji

Przedstawione rezultaty badań wykazały, że postać krzywej umocnienia materiału modelowego bardzo istotnie wpływa zarówno na poziom jak i charakter przebiegu siły wyciskania. Na podstawie wartości współczynnika t_{sr} można, zatem wnioskować o wynikach modelowania fizycznego dla różnego dopasowania krzywych umocnienia materiału modelowego do krzywej umocnienia wybranego materiału rzeczywistego. Dla mieszaniny złożonej z filii i 10 % lanoliny ($t_{sr} = 0,147$), która ulega osłabieniu już przy małych wartościach odkształceń, uzyskano bardzo mały zakres, w którym następuje wzrost siły, oraz duży zakres o dość intensywnym spadku siły. Diametralnie odmienny przebieg siły wyciskania uzyskano dla mieszaniny filii z 16 % kaolinu, dla której $t_{sr} = 0,06$. Dla tej mieszaniny następował wzrost siły wyciskania aż do połowy całkowitej drogi stempla, po czym dochodziło do gwałtownego spadku siły spowodowanego lokalnym pękaniem próbki. Pod koniec procesu wyciskania następował ponownie jej wzrost.



Rys. 9.2.10. Zdjęcia odkształconych próbek z siatkami koordynacyjnymi dla różnych materiałów modelowych:
a) filia + 10 % lanoliny, b) filia + 7 % lanoliny, c) filia + 8 % kaolinu, d) filia + 16 % kaolinu

Przedstawione zdjęcia siatek koordynacyjnych dla wybranych materiałów wykazują jakościowe różnice a dokładniejsze ich określenie wymaga wyznaczenia rozkładu odkształceń. Jednakże na podstawie makroskopowej analizy można wnioskować, że sposób deformacji próbek wykonanych z mieszaniny filii z 8 i 16 % kaolinu jest bardzo zbliżony do sposobu deformacji czystej filii. Mieszaniny te podobnie jak filia mają małe wartości współczynnika podobieństwa (odpowiednio $t_{sr} = 0,042$ i $0,06$), co świadczy o dość dobrym dopasowaniu krzywych umocnienia materiału modelowego do rzeczywistego. Natomiast w przypadku mieszaniny filii z lanoliną uzyskano duże wartości współczynnika t_{sr} , co świadczy o złym dopasowaniu krzywych umocnienia. Dla filii z 10 % lanoliny $t_{sr} = 0,147$, zaś dla mieszaniny filii z 7 % lanoliny $t_{sr} = 0,101$. Także sposób płynięcia takich materiałów jest zdecydowanie inny od pozostałych mieszanin.

9.3. Numeryczna symulacja procesów rzeczywistych

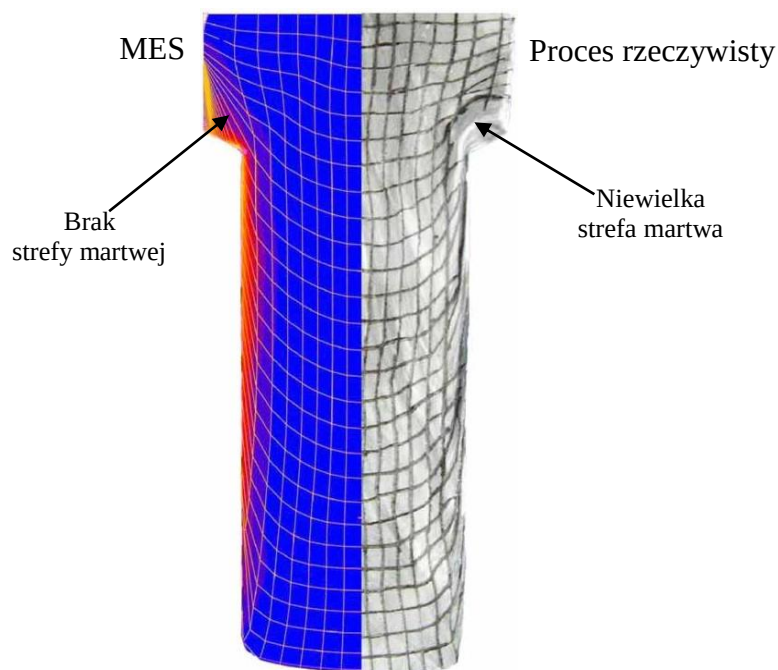
W celu porównania możliwości modelowania fizycznego i numerycznego przeprowadzono modelowanie numeryczne analizowanych procesów za pomocą MES.

9.3.1. Modelowanie numeryczne wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcenia

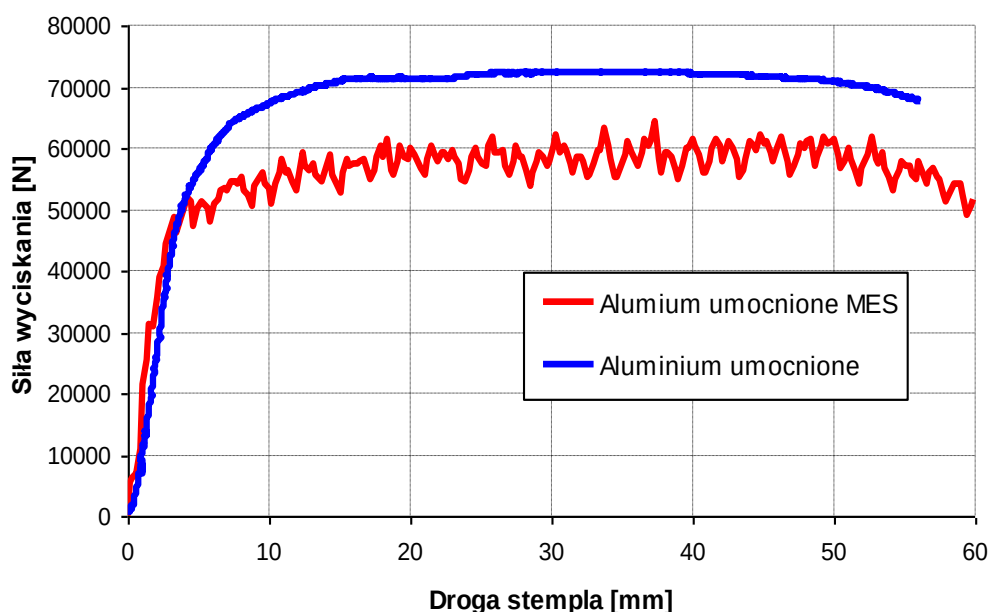
Modelowanie numeryczne procesu wyciskania współbieżnego przeprowadzono dla wszystkich materiałów rzeczywistych. W pracy przedstawiono jedynie wyniki badań dotyczące wyciskania aluminium umocnionego w płaskim stanie odkształcenia. Wybrano ten materiał, gdyż w modelowaniu fizycznym zgodnie z nowym warunkiem podobieństwa plastycznego dla tego materiału współczynnik podobieństwa $t_{sr} = 0,042$ miał wartość pośrednią spośród pozostałych par materiałów. Numeryczny model termomechaniczny procesu rzeczywistego zbudowano za pomocą programu Marc Mentat 2005. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla aluminium umocnionego zostały wprowadzone w formie numerycznej dla różnych wartości odkształceń, prędkości odkształcenia i temperatury. Do dyskretyzacji materiału odkształcanego użyto 700 elementów czworokątnych typu Solid 11 (Quad 4). Zastosowano automatyczną odbudowę odkształconej siatki ze zmianą ilości oraz rozkładu gęstości elementów ze względu na deformację i penetrację elementu w narzędzia. W modelu numerycznym procesu wyciskania aluminium umocnionego wszystkie narzędzia: matryca, stempel i pojemnik – przyjęto jako sztywne. Warunki brzegowe przyjęto zbliżone do panujących w procesie rzeczywistym. Zastosowano model tarcia Coulomba oraz następujące współczynniki wymiany ciepła: dla aluminium – ciepło właściwe 0,92 kJ/(kgK) i przewodność cieplna 203,5 W/(mK) oraz dla stalowych narzędzi – ciepło właściwe 0,46 kJ/(kgK) i przewodność cieplna 15 W/(mK).

Początkowo w modelowaniu numerycznym wprowadzono stałą wartość współczynnika tarcia dla poszczególnych narzędzi wynoszącą 0,05, wyznaczoną w próbie pierścieniowej. Dla takich warunków odkształcania uzyskany z MES sposób płynięcia materiału (rys. 9.3.1.1), który jedynie nieznacznie odbiegał od procesu rzeczywistego. Natomiast poziom siły wyciskania w funkcji drogi stempla (maksymalna siła wyciskania wynosiła 62 kN) był ponad 15 % mniejszy niż w procesie rzeczywistym (rys. 9.3.1.2). W modelowaniu numerycznym nie udało uzyskać się dla tych warunków odkształcania tworzenia się strefy martwej w narożach matrycy, którą zaobserwowano zarówno w procesie rzeczywistym jak i w modelu fizycznym. Przypuszczalnie przyczyną tych różnic było przyjęcie stałej wartości współczynnika tarcia dla wszystkich narzędzi w modelu numerycznym. W procesie rzeczywistym, jak i fizycznym prawdopodobnie w wyniku złego smarowania w obszarze wykroju matrycy pojawia się

nieciągłość warstwy smaru i współczynnik tarcia osiąga większe wartości niż 0,05, jak przyjęto w modelowaniu numerycznym.



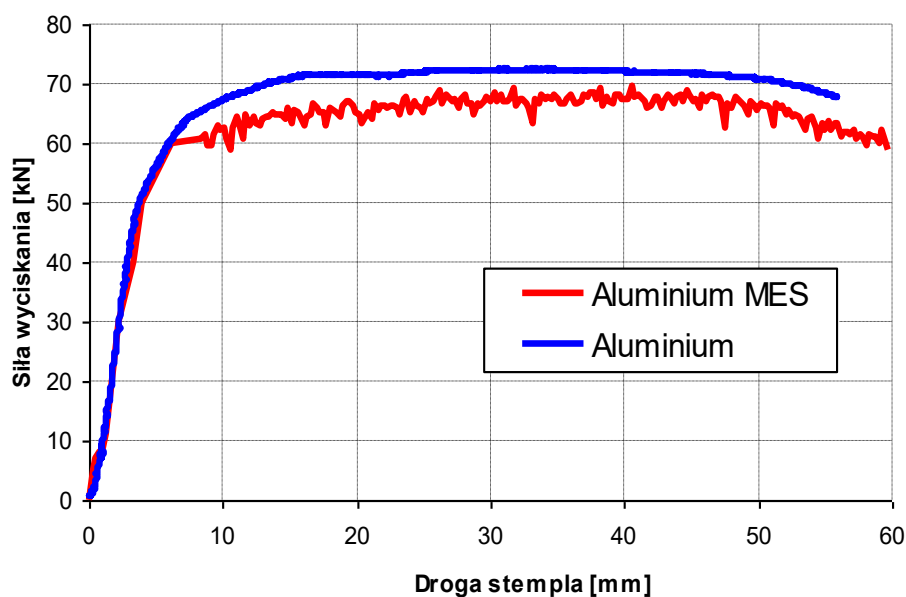
Rys. 9.3.1.1. Sposób płynięcia materiału uzyskany z MES (wykorzystując do tego specjalną opcję programu tzw. „flow line”) oraz w procesie rzeczywistym



Rys. 9.3.1.2. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego oraz uzyskany z modelu numerycznego w programie Marc Mentat 2005

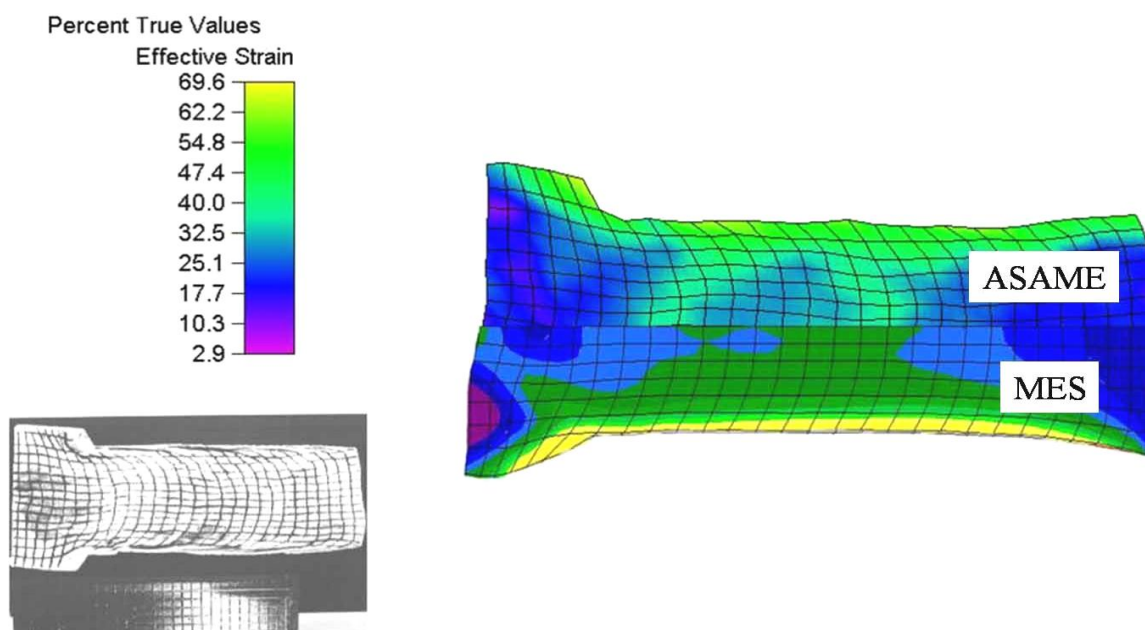
Następne symulacje numeryczne przeprowadzono zostały dla większych wartości współczynnika tarcia. Ostatecznie podobny sposób płynięcia materiału oraz przebieg siły wyciskania uzyskano w modelu numerycznym i w procesie rzeczywistym, gdy przyjęto różne współczynniki tarcia dla poszczególnych narzędzi. Dla stempla przyjęto współczynnik 0,05,

dla pojemnika 0,1 oraz dla matrycy 0,25. Na rys. 9.3.1.3 przedstawiono uzyskane przebiegi siły w funkcji drogi stempla dla modelowania numerycznego dla nowych warunków tarcia oraz dla procesu rzeczywistego.



Rys. 9.3.1.3. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego oraz uzyskany z modelu numerycznego po korekcie współczynnika tarcia

W celu pełniejszej analizy dokonano oceny zarówno podobieństwa sposobu płynięcia materiału, jak i rozkładu odkształceń za pomocą programu do analizy obrazu ASAME oraz wyników uzyskanych z MES (rys. 9.3.1.4).



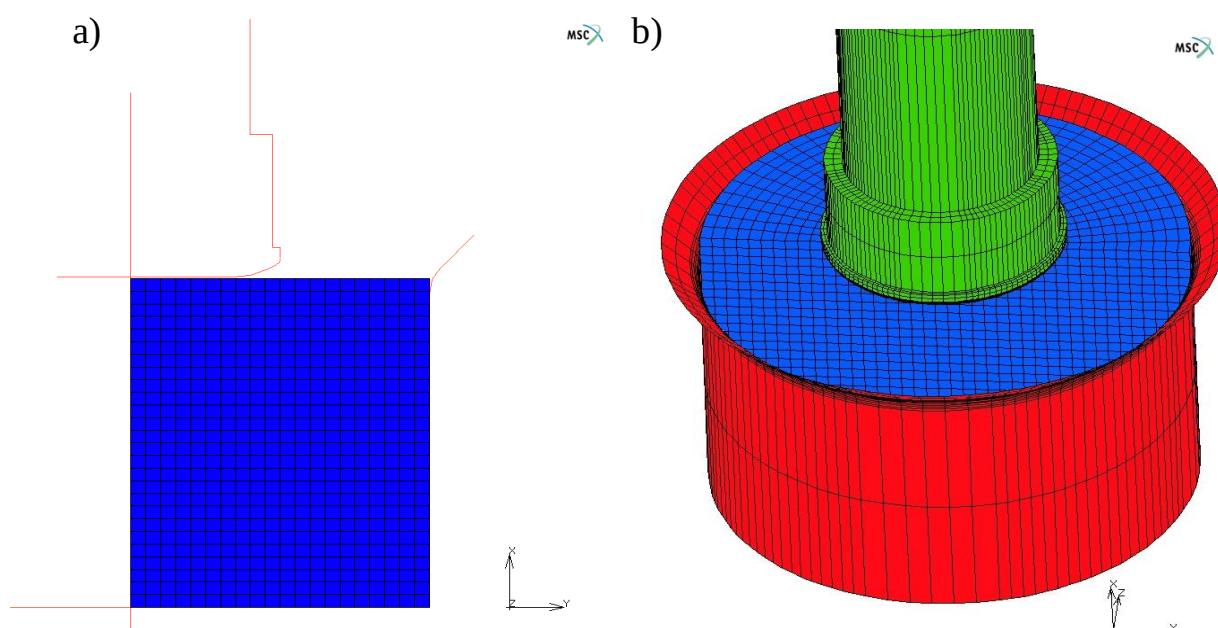
Rys. 9.3.1.4. Rozkłady odkształceń zastępczych uzyskane z MES i wyznaczone przy użyciu programem ASAME dla procesu rzeczywistego

Po wprowadzeniu nowych warunków brzegowych do modelu numerycznego uzyskano wyniki bardzo zbliżone do procesu rzeczywistego. Jedyne siła wyciskania w modelu numerycznym była o około 5 % mniejsza niż w procesie rzeczywistym. Różnica ta może wynikać, z faktu, że model numeryczny dotyczył płaskiego stanu odkształcenia i różnił się od rzeczywistego procesu tym, że nie uwzględniał on sił tarcia pomiędzy ścianką boczną próbki i pojemnikiem

Podczas projektowania procesów kształtowania plastycznego przy pomocy MES trudno przeprowadzić korektę warunków brzegowych, gdyż do tego konieczne są informacje uzyskane w procesie rzeczywistym. Do weryfikacji modelu numerycznego można więc posłużyć się modelem fizycznym. W takim jednak przypadku należy brać pod uwagę fakt, że model ten może być obciążony również błędami zwłaszcza, gdy do weryfikacji stosuje się parametry siłowe.

9.3.2. Modelowanie numeryczne osiowosymetrycznego procesu wyciskania przeciwbieżnego

Termomechaniczny model numeryczny procesu wyciskania przeciwbieżnego ołowiu został zbudowany również w programie Marc Mentat 2005. Krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie dla ołowiu zostały wprowadzone w formie numerycznej dla różnych wartości odkształceń, prędkości odkształcenia i temperatury. Do dyskretyzacji materiału odkształcalnego użyto 520 elementów czworokątnych typu Solid 11 (Quad 4). Zastosowano „remeshing” ze zmianą ilości oraz rozkładu gęstości elementów ze względu na deformację i penetrację elementu w narzędzia. Z racji użycia automatycznej odbudowy odkształconej siatki podczas modelowania ilość elementów zmieniała się od 520 do 1242. Z uwagi na duże przemieszczenia do opisu kinematyki odkształceń wybrano procedurę Updated-Lagrange. Narzędzia - matryca, stempel – przyjęto jako nieodkształcalne. Warunki brzegowe przyjęto zbliżone do panujących w procesie rzeczywistym. Zastosowano bilinearny model tarcia Coulomba i współczynnik tarcia równy 0,055 oraz następujące współczynniki wymiany ciepła: dla ołowiu – ciepło właściwe 0,135 kJ/(kgK) i przewodność cieplna 35,9 kJ/(kgK) oraz dla stalowych narzędzi – ciepło właściwe 0,46 kJ/(kg K) i przewodność cieplna 15 W/(mK). Natomiast współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a narzędziem α – 2000 W/Km², współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a powietrzem α_{pow} – 100 W/Km²; dla materiału i narzędzi przyjęto temperaturę otoczenia, równą 22 °C.

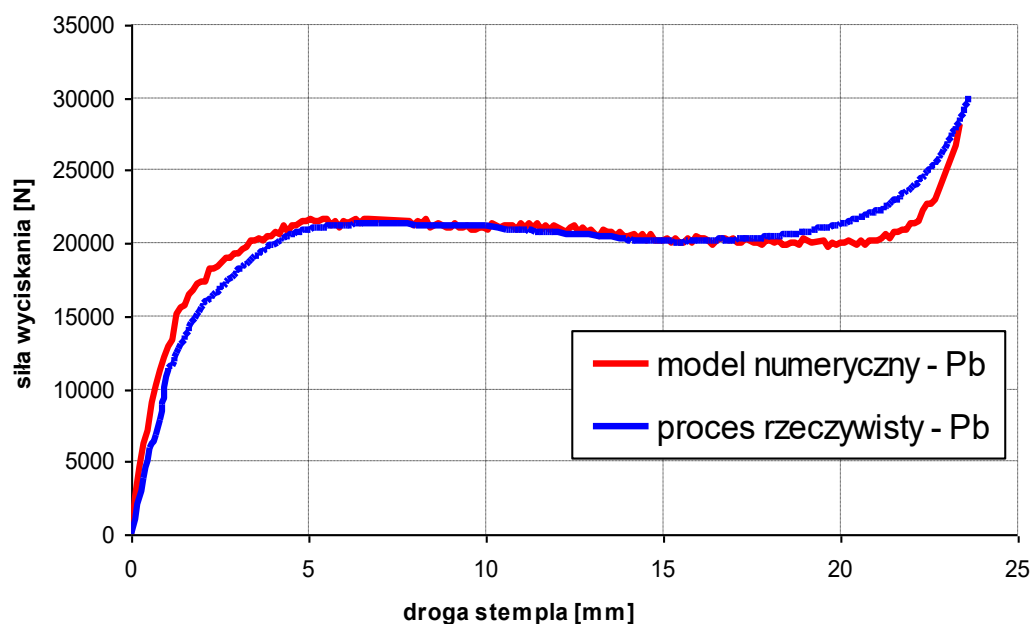


Rys. 9.3.2.1. Wyciskanie przeciwbieżne – model osiowosymetryczny wraz z narzędziami, w zerowym czasie procesu: a) model płaski oraz b) model rozwinięty do 3D

Model numeryczny procesu wyciskania przed rozpoczęciem obliczeń przedstawiono na rys. 9.3.2.1. Proces został zamodelowany jako osiowosymetryczny, jednakże dodatkowo w celu lepszego zobrazowania przebiegu procesu i łatwiejszej jego analizie wykorzystano specjalną opcję w programie obliczeniowym pozwalającą na transformację modelu 2D na model 3D.

Przeprowadzone wstępne symulacje wykazały, że aby otrzymać pod stemplem podobną strefę martwą jak w procesie rzeczywistym należy dla stempla przyjąć większy współczynnik tarcia niż wyznaczony w próbie pierścieniowej, wynoszący 0.18, natomiast dla matrycy współczynnik tarcia wynoszący 0.1. Podobnie jak w przypadku modelowania numerycznego procesu wyciskania współbieżnego aluminium umocnionego, po korekcie współczynnika tarcia otrzymano podobny sposób płynięcia materiału oraz bardzo zbliżone przebiegi siły wyciskania jak w procesie rzeczywistym wyciskania przeciwbieżnego ołowiu.

Zależności siły od przemieszczenia stempla wyznaczone metodą elementów oraz otrzymane w procesie rzeczywistym przedstawiono na rys. 9.3.2.2.

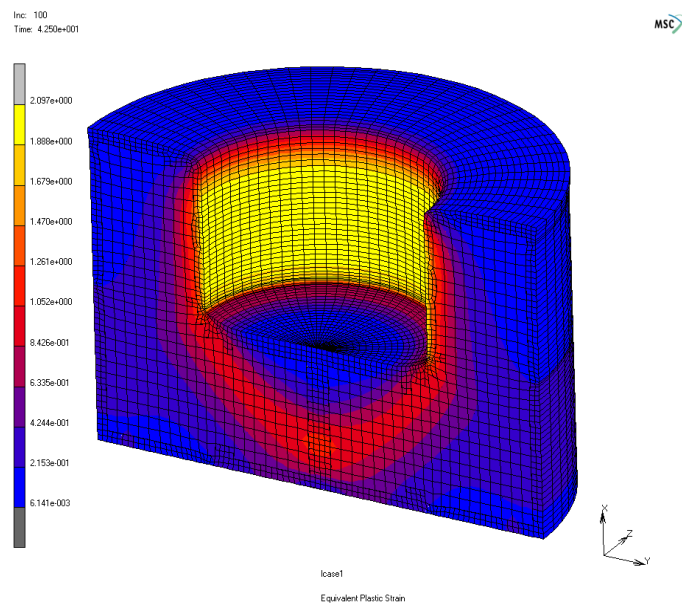


Rys. 9.3.2.2. Przebieg siły wyciskania w funkcji drogi stempla dla procesu rzeczywistego oraz uzyskany z modelu numerycznego po korekcie współczynnika tarcia

Maksymalna wartość siły wyciskania w modelu numerycznym, wynosi około 21,6 kN przy przemieszczeniu stempla równym 5 mm. W modelu numerycznym maksimum siły występuje wcześniej niż w procesie rzeczywistym, gdyż nie ma w nim początkowej fazy spęczania materiału wyciskanego. W modelu numerycznym materiał wyjściowy przylega do ścianek pojemnika i stempla. Z tego wynika również szybsze narastanie siły w modelu numerycznym w początkowym zakresie przemieszczenia stempla w porównaniu do przebiegu siły w procesie rzeczywistym.

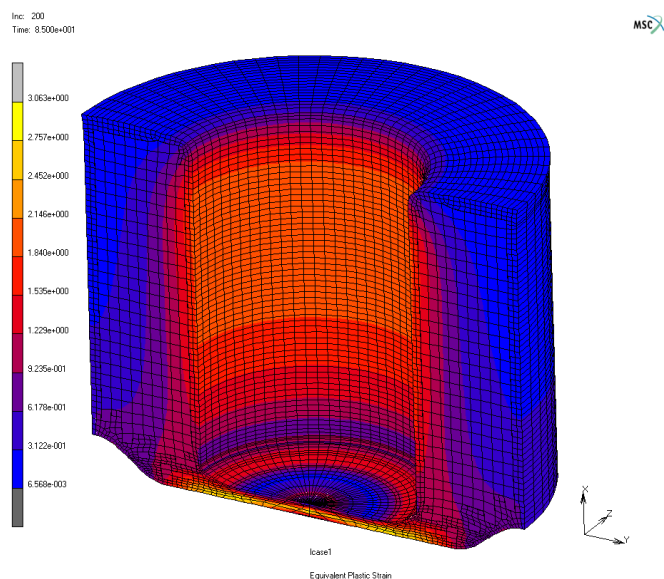
W dalszej fazie wyciskania, w modelu numerycznym tak jak w procesie rzeczywistym, następuje spadek siły wyciskania, zjawisko to jest ściśle zależne od danych materiałowych zdefiniowanych przy tworzeniu modelu i jest odzwierciedleniem osłabienia ołowiu. W końcowym etapie wyciskania następuje gwałtowny wzrost siły wyciskania. Zwiększenie wartości siły nie jest tak wyraźne jak w przypadku procesu rzeczywistego. Różnice w poziomie siły wyciskania w końcowym etapie wyciskania są efektem prawdopodobnie częściowego lub całkowitego przerwania filmu smarnego w rzeczywistym procesie. Podobną sytuację zaobserwowano również w ostatnim etapie wyciskania w procesie fizycznym, gdzie prawdopodobnie przy większych naciskach następował wzrost współczynnika tarcia.

Na rys. 9.3.2.3 przedstawiony jest rozkład zastępczego odkształcenia plastycznego w fazie ustalonej procesu wyciskania przy przemieszczeniu stempla równym 13 mm.



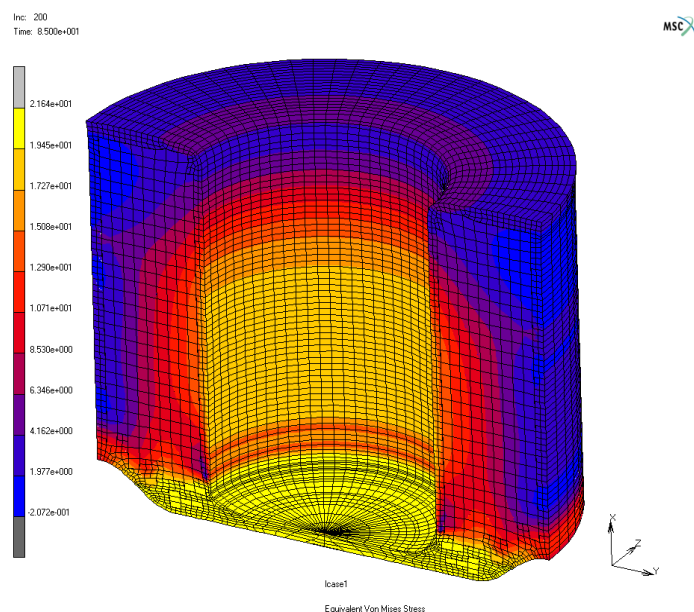
Rys. 9.3.2.3. Zastępcze odkształcenie plastyczne podczas wyciskania przeciwbieżnego – przemieszczenie stempla 13 mm

Z kolei na rys. 9.3.2.4 przedstawiono rozkład zastępczych odkształceń plastycznych w końcowym stadium procesu – przy przemieszczeniu stempla 23,5 mm.



Rys. 9.3.2.4. Rozkład zastępczego odkształcenia plastycznego podczas wyciskania przeciwbieżnego – przemieszczenie stempla 23,5mm

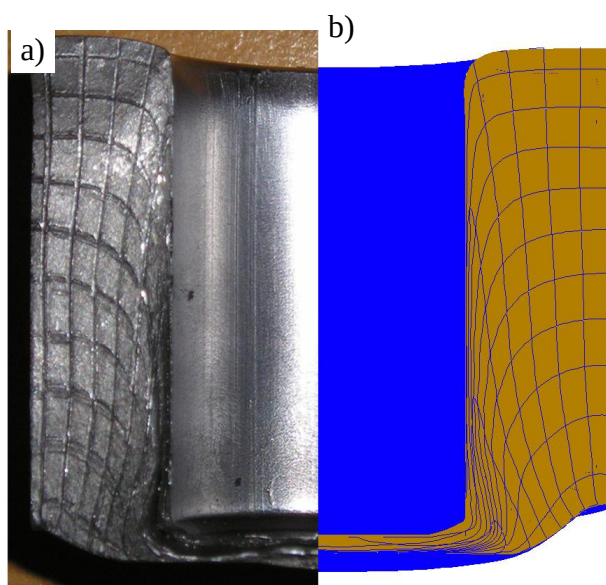
Na rys. 9.3.2.3 i 9.3.2.4 widoczne są strefy, w których materiał doznał stosunkowo małych odkształceń (przy ściankach i podstawie pojemnika oraz obszar pod stemplem), strefy te oddzielone są od siebie obszarem intensywnego płynięcia materiału, tzw. strefa ścinania - obszar materiału najbardziej odkształconego podczas wyciskania. Powstanie obszarów o niewielkich odkształceniach jest wynikiem działania siły tarcia pomiędzy materiałem odkształcanym a stemplem i pojemnikiem. W podobny sposób płynął materiał modelowy (rys. 9.2.6).



Rys. 9.3.3.6. Rozkład zastępczego naprężenia Hubera-Missesa podczas wyciskania przeciwbieżnego – przemieszczenie stempla 23,5 mm

Rys. 9.3.3.6 przedstawia rozkład naprężenia uplastyczniającego przy przemieszczeniu stempla 23,5 mm, w końcowym stadium procesu wyciskania przeciwbieżnego.

W celu pełniejszej analizy porównano sposób płynięcia materiału na podstawie deformacji siatek koordynacyjnych dla odkształconych próbek ołowiu w procesie rzeczywistym i modelu numerycznego, w którym użyto specjalnej funkcji tzw. „flow lines”. Uzyskanie wyniki przedstawiono na rys. 9.3.3.7.



Rys. 9.3.3.7. Odkształcenie siatek koordynacyjnych podczas wyciskania przeciwbieżnego: a) proces rzeczywisty, b) model numeryczny (wykorzystanie opcji „flow lines”)

Przedstawione wyniki badań i symulacji komputerowych przy użyciu MES wykazały, że zbudowany termomechaniczny model numeryczny poprawnie odzwierciedlał proces rzeczywisty wyciskania przeciwbieżnego ołowiu.

Metoda elementów skończonych oparta jest na szeregu uproszczeń, zatem rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi, a wynikami otrzymanymi przy użyciu tej metody są spowodowane niemożliwością dokładnego odwzorowania i opisanie zjawisk zachodzących w rzeczywistych procesach. Dlatego niezbędna jest weryfikacja, do której może zostać zastosowane modelowanie fizyczne, jako alternatywa w stosunku do drogiego i czasochłonnego procesu przemysłowego.

W modelowaniu numerycznym dla warunków tarcia określonych w próbie pierścieniowej, nie udało uzyskać się tworzenia strefy martwej w narożach, którą zaobserwowano zarówno w procesie rzeczywistym jak i w modelu fizycznym. Poza tym w procesie modelowym zaobserwowano, że w obszarze przejściowym (wyciskanie współbieżne) dochodziło do lokalnego rozdzielania materiału, czego nie udało się poprawnie zamodelować w MES-ie. Wynika stąd pewna przewaga metod fizycznego modelowania nad modelowaniem numerycznym, gdyż jak dowiedziono w rozdziale 2.3.2 stosując MES do analizy procesów obróbki plastycznej napotyka się na poważne problemy związane z brakiem odpowiednich kryteriów pęknięcia, czy utratą stateczności oraz poprawnym określeniem warunków tribologicznych. Istotnym problemem podczas modelowania numerycznego pozostaje problem tarcia i oceny współczynnika tarcia przy bardzo dużych naciskach i odkształceniach. Poprzez porównanie wyników modelowania fizycznego i numerycznego danego procesu istnieje możliwość doboru optymalnego współczynnika tarcia w danym procesie.

Modelowanie fizyczne można wykorzystać do uzupełnienia bądź sprawdzenia modelowania numerycznego. Uzyskane wyniki dotyczące sił wyciskania i rozkładu odkształceń, dla analizowanych sposobów wyciskania uzyskane z modelowania numerycznego i fizycznego są bardzo zbliżone pomimo pewnej różnicy w przyjętym współczynniku tarcia. Obecnie stosując MES i prowadząc eksperymenty z materiałami modelowymi, projektant – technolog może obniżyć koszty poprzez poprawę możliwych do osiągnięcia tolerancji, zwiększenie trwałości narzędzi, przewidywać i zapobiegać powstawaniu wad oraz dokonać prognozy własności wyrobu.

10. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono modelowanie fizyczne, jego ideę i podstawowe warunki podobieństwa wraz z ich matematycznymi opisami. Przedstawiono również zastosowanie metod fizycznego modelowania do analizy i optymalizacji procesów kształtowania plastycznego. Modelowanie fizyczne, wykorzystujące miękkie materiały modelowe, umożliwia przy niskich kosztach jego realizacji, badanie oddziaływania wielu czynników trudnych lub niemożliwych do zbadania (z różnych powodów) w rzeczywistych procesach. Podstawowym ograniczeniem modelowania fizycznego są problemy związane z transformacją wyników modelowania na rzeczywiste procesy, wynikające z trudności zachowania wszystkich warunków podobieństwa. Przeprowadzone badania wykazały, że dobór materiału modelowego jest kluczowym czynnikiem do zbudowania poprawnego modelu fizycznego, co ściśle wiąże się z warunkiem podobieństwa plastycznego. Jak wykazała analiza stanu zagadnienia stosowane powszechnie matematyczne opisy warunków podobieństwa w modelowaniu fizycznym są niewystarczające, zwłaszcza opisu warunku podobieństwa plastycznego. Warunek podobieństwa plastycznego wymaga stosowania dokładniejszego opisu krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie (krzywych umocnienia). Dotyczy to zwłaszcza obróbki plastycznej na gorąco, gdy w początkowym zakresie odkształcenia materiał ulega umocnieniu, zaś dla większych odkształceń ulega on osłabieniu. W rozprawie przeanalizowano i wykazano niedoskonałości stosowanego obecnie matematycznego opisu warunku podobieństwa plastycznego. Zaproponowano nowe podejście do warunku podobieństwa plastycznego, w którym przyjmuje się ilościową ocenę dopasowania kształtu krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie. Nowy opis warunku podobieństwa plastycznego zweryfikowany został w oparciu o dwa procesy wyciskania materiałów rzeczywistych o różnym charakterze krzywych umocnienia. Zachowanie pozostałych warunków podobieństwa uzyskano stosując w wybranych procesach odpowiednie warunki odkształcania: małe prędkości odkształcania, przy których dynamika procesów może być pominięta, duże odkształcenia plastyczne, przy których odkształcenia sprężyste nie odgrywają większej roli, izotermiczne warunki odkształcania, taką samą geometrię oraz dobrano niemal identyczne warunki tarcia w modelowaniu fizycznym i w procesie rzeczywistym.

Wymagało to zaprojektowania i budowy specjalistycznego Laboratorium do Modelowania Fizycznego, wyposażonego w niezbędne urządzenia i narzędzia do realizacji eksperymentów modelowych. Stworzona została również baza danych ułatwiająca dobór materiałów modelowych dla materiałów rzeczywistych. Przeprowadzone badania nad

materiałami modelowymi wykazały, że modyfikując ich skład (poprzez dodatki kaolinu, lanoliny, parafiny, kredy) oraz zmieniając prędkość odkształcania i temperaturę uzyskuje się modele krzywych naprężenie uplastyczniające – odkształcenie odpowiadające różnym materiałom rzeczywistym. Podjęto także próbę poznania oraz wyjaśnienia zjawisk dotyczących umacniania i osłabiania się miękkich materiałów modelowych na bazie wosku filii i plasteliny oraz ich mieszanin podczas odkształcania.

Dodatkowo przeprowadzona numeryczna symulacja komputerowa rzeczywistych procesów wyciskania współbieżnego aluminium umocnionego oraz wyciskania przeciwbieżnego ołowiu potwierdziła poprawność realizacji eksperymentów przy użyciu modelowania fizycznego tychże procesów. Przy czym modelowanie fizyczne pozwoliło zweryfikować przyjęte w modelowaniu numerycznym warunki tarcia.

Nowe podejście do warunku podobieństwa plastycznego wprowadza współczynnik skali C_{sr} oraz dodatkowo współczynnik podobieństwa t_{sr} . Współczynnik ten jest wielkością bezwymiarową, która w prosty i szybki sposób pozwala określić ilościowe dopasowanie materiału modelowego do rzeczywistego. Przeprowadzone badania wykazały, że na podstawie współczynnika podobieństwa materiału modelowego do materiału rzeczywistego t_{sr} można oszacować dokładność modelu fizycznego, przy poprawnym zachowaniu pozostałych warunków podobieństwa. Należy zwrócić uwagę, że im większa jest wartość tego parametru, świadcząca o gorszym dopasowaniu krzywych umocnienia materiału modelowego do materiału rzeczywistego, tym również gorsze jest podobieństwo przebiegów siły wyciskania po odpowiedniej transformacji oraz sposób płynięcia materiału w modelu fizycznym do przebiegu siły oraz sposobu płynięcia materiału rzeczywistego. Na podstawie współczynnika t_{sr} można oceniać stopień dopasowania wyników z modelowania fizycznego do procesu rzeczywistego. Ponieważ czasami nie ma możliwości dobrego dopasowania krzywych umocnienia materiału modelowego do materiału rzeczywistego wyznaczając współczynnik t_{sr} można oszacować dokładność uzyskanych wyników. Ponadto zaletą nowego opisu warunku podobieństwa plastycznego jest operowanie numerycznym zapisem rzeczywistych przebiegów naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia. Nie ma zatem konieczności opisywania krzywej umocnienia mniej lub bardziej złożoną funkcją matematyczną w ten sposób można uniknąć błędów wynikających z niedokładności matematycznego opisu krzywej umocnienia.

11. WNIOSKI

- Przeprowadzone badania udowodniły postawioną tezę, że na podstawie współczynnika podobieństwa t_{sr} i współczynnika skali C_{sr} w nowym matematycznym opisie warunku podobieństwa plastycznego można w bardzo prosty i szybki sposób oszacować dokładność modelu fizycznego dla danego procesu rzeczywistego, przy zachowaniu pozostałych warunków podobieństwa. Można przyjąć, że jeżeli współczynnik t_{sr} zawiera się w przedziale:

$0 \div 0,04$ – uzyskuje się dobrą zgodność sposobu płynięcia materiału i parametrów siłowych modelu fizycznego i procesu rzeczywistego,

$0,04 \div 0,07$ – otrzymuje się dobrą zgodność sposobu płynięcia materiału modelowego i rzeczywistego, natomiast parametry siłowe wyznaczone w modelu fizycznym mogą być obarczone błędem,

powyżej 0,07 – modelowanie fizyczne źle opisuje proces rzeczywisty.

- W pracy przedstawiono część opracowanej bazy danych, zawierającej krzywe naprężenie uplastyczniające – odkształcenie materiałów modelowych utworzonych na bazie syntetycznego wosku filii oraz plasteliny białej, ułatwiającej dobór materiałów do modelowania fizycznego. Przy czym, jak wykazały badania w trakcie wytwarzania materiałów modelowych, należy przestrzegać ściśle określonych procedur postępowania. Również każda partia bazowego materiału modelowego, mimo zapewnień ze strony producenta, posiada różne właściwości. Nie uwzględnienie tego faktu, może być przyczyną wielu błędów w modelowaniu fizycznym.

- Dla materiałów rzeczywistych wykazujących bardzo duże umocnienie odkształceniowe nie istnieją jeszcze odpowiednie materiały modelowe, bazujące na wosku filii i plastelinie. Znalezienie takich materiałów ułatwiłoby znacznie modelowanie fizyczne procesów kształtowania plastycznego na zimno. Przy czym kształt krzywych umocnienia filii można modyfikować w większym stopniu poprzez dodanie różnych składników niż kształt krzywych umocnienia dla plasteliny.

- Ze względu na właściwości materiałów modelowych, łatwiej jest modelować procesy obróbki plastycznej na gorąco. Zaobserwowano również, że dla takich warunków odkształcania, niedopasowanie krzywych umocnienia materiału modelowego i rzeczywistego ma mniejszy wpływ na poprawność wyniku niż dla obróbki plastycznej na zimno.

- Istnieje możliwość sterowania poziomem naprężenia uplastyczniającego krzywych materiałów modelowych poprzez zmianę temperatury odkształcania, a także poprzez zmianę prędkości odkształcania.

- Istotnym problemem podczas modelowania numerycznego pozostaje problem tarcia i oceny współczynnika tarcia przy bardzo dużych naciskach i odkształceniach. Badania wykazały, że w przypadku dużych nacisków, jakie panują na powierzchni matrycy, rzeczywisty współczynnik tarcia może znacznie odbiegać od wyznaczonego w prostych próbach tarcia.
- Stosowny dotychczas matematyczny sposób opisu warunku podobieństwa plastycznego materiału modelowego do rzeczywistego jest niewystarczający. Dotyczy to zwłaszcza obróbki plastycznej na gorąco, kiedy materiał w początkowym zakresie odkształcania umacnia się (wzrost naprężenia uplastyczniającego), natomiast dla odkształceń większych od krytycznych ulega osłabieniu (spadek naprężenia uplastyczniającego).
- W modelowaniu fizycznym parametry siłowe mogą być poprawnie wyznaczone tylko w przypadku bardzo dokładnego spełnienia wszystkich warunków podobieństwa a w szczególności warunku podobieństwa plastycznego.
- Strefa martwa w materiałach modelowych tworzy się szybciej i jest większa niż w materiałach rzeczywistych. Należy to tłumaczyć większą czułością tych materiałów na wzrost temperatury oraz mniejszymi odkształceniami granicznymi niż materiały rzeczywiste.
- Stan naprężenia wpływa istotnie na kształt krzywej umocnienia. Krzywe umocnienia, które są stosowane do analizy procesów kształtowania plastycznego należy określać w takich próbach plastometrycznych, w których występuje podobny stan naprężenia jak w tych procesach.
- Prowadzone modelowanie fizyczne różnych procesów kształtowania plastycznego pozwoliły zebrać pakiet informacji, które byłyby trudne do uzyskania w procesach przemysłowych a dotyczą między innymi: sił kształtowania, sposobu płynięcia materiału, możliwości zastąpienia złożonych struktur prostymi modelami.
- Przedstawione wyniki badań powinny znaleźć zastosowanie w zakładach przemysłowych, w których stosowane są takie procesy jak wyciskanie, kucie i prasownie wyrobów hutniczych jak i części maszyn. Oszczędności, wynikające z możliwości weryfikacji procesu opracowanego w oparciu o modelowanie numeryczne za pomocą modelu fizycznego w miejsce procesu rzeczywistego, są znaczące.
- Wzajemna weryfikacja modelowania numerycznego i metod fizycznego modelowania procesów kształtowania plastycznego materiału pozwoli na zminimalizowanie rzeczywistego eksperymentu, a w przyszłości być może nawet na całkowite jego wyeliminowanie.
- Odkształcaniu materiałów modelowych towarzyszą niezwykle interesujące, a zarazem bardzo złożone zjawiska. Pomimo że ich poznanie jest bardzo trudne i kosztowne, powinny być prowadzone w tym kierunku specjalistyczne badania, gdyż przyczyniłoby się one do jeszcze lepszego wykorzystania materiałów modelowych w analizie procesów kształtowania plastycznego.

12. LITERATURA:

- 1 Abdul-Aziz A.: Assesment of crack growth in space shuttle main engine first-stage high-pressure fuel turbopump blade, *Finite Elements in Analysis and Design* 39, 2002 1-15.
- 2 Adamczyk G.: Characterization of Five Engineering Materials and Lubricants and Compounding of Modeling Materials with Repicating Characteristics, The Technical University of Denmark Institute of Manufacturing Engineering, Internal report, 1992.
- 3 Adams M.J., Biswas S.K., Briscoe B.J., Sinha S.K.: A Two roll mill as a Rheometer for Pastes, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Material Research Society, 1989, t.289, s. 237-257.
- 4 Al-Dahwi A.K.A., Blazynski T.Z.: Inhomogeneity of Flow, Force Parameters and Pass Geometry in Rotary Cone-Roll Tube Piercing, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 1992, t.23, s.29-38.
- 5 Alder J., Phillips K. A.: The effect of strain-rate and temperature on the resistance of aluminum, copper and steel to compression, *J. Inst. Metals*, 83, 1954, 80-88.
- 6 Altan T., Henning H. J., Sabroff A. M.: The Use of Model Materials in Predicting of Forming Loads in Metalworking. *Trans. Of ASME, Journ. of Eng. For Industry*, May 1970, 444-452.
- 7 Anderson C.B.:Elastic Tool Deflection in Metal Forming, *Praca doktorska*, Inst. of Manuf. Engineer. Technical University of Denmark, 1996.
- 8 Arentoft M., Gronostajski Z., Niechajowicz A., Wanheim T.: Modelowanie fizyczne procesów kształtowania, II Międzynarodowe seminarium, Zagadnienia Transferu Nowoczesnych Technologii Obróbki Plastycznej, Wrocław 1996, 51-62.
- 9 Arentoft M., Gronostajski Z., Niechajowicz A., Wanheim T.: Physical modelling of metal forming processes, *Journal of Mat. Process. Technology*, 106, 2000, 2-7.
- 10 Arentoft M., Henningsen P., Bay N., Wanheim T.: Simulations of Defects in Metal Forming, *J. of Mech. Work. Technology*, 1994, t.45, s.527-532.
- 11 Arentoft M., Petersen S.B., Rodrigues J.M.C, Martins P.A.F., Balendra L., Wainaim T.: Review of research into the injection forging of tubular materials, *J. of Mech. Work. Technology*, v. 52, 1995, 460-471.
- 12 Arentoft M.: Prevention of defects in forging by numerical and physical simulation, Technical university of Denmark Institute of Manufacturing Engineering, Spring 1996.
- 13 Ashby M.F., Jones D.R.H.: *Materiały Inżynierskie 2*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996, 277-309.
- 14 Azushima A., Kudo H.: Physical Simulation for Metal Forming with Strain Rate Sensitive Model Material, *Advanced Technology of Plasticity* 1987, vol. II, Stuttgart, 1221-1227.
- 15 Barsoum F.F., Corroll W.F.: Evaluating the serviceability of cracked reinforced concrete space shuttle crawler way tunnel, *Computers & Structures* vol. 60., nr 2, 173-179, 1996.
- 16 Barton J.W., Bodsworth C., Halling J.: The Use of Paraffin Wax as a Model Material to Simulate the Plastic Deformation of Metals, Part II: Practical Application of this Technique, *Journ. of the Iron and Steel Inst.*, April 1958, 321-331.
- 17 Bay N., Hansen A., Andersen C.B., Oudin J., Picart P.: Comparison Beetwen FE and Physical Modelling of Closed-Die Forging, *RISO Conference Proceedings*, 1992, 221-226.
- 18 Bay N., Lassen S., Pedersen C.D, Maegaard V.: Lubrication Limits in Backward Can Extrusion, *Annals of CIRP*, v. 40, 1, 1991, 11-14.
- 19 Bay N.: Friction Stress and Normal Stress in Bulk Forming Processes, *An. CIRP*, 1999, nr 1, s.239-242.
- 20 Bennani B.: Analysis of the Limits of Lubrication in Backward Can Extrusion, *MM-report No. 94.13*, The Technical University of Denmark Institute of Manufacturing Engineering, Internal report, 1994.
- 21 Biuletyn Urzędu Patentowego 8/374/1988 „Plastelina szczególnie do modelowania”, Przedsiębiorstwo Chemii Gospodarczej PRODRYN Chorzów.
- 22 Blazynski T. Z., Jub C.: Dinamic and Dimentional Similarity of Model and Prototype Assel Tube-Elongating Mills, *J. Inst. Met.*, 99, 1971, 186-200.

- 23 Blazynski T.Z.: Optymization of Die Design in the Extrusion of Rod Using Model Materials, *Int. J. Mech. Sci.*, 13, 2, 1971, 113-131.
- 24 Bodnar R. L., Ronemus D. C., Bramfitt B.L., Shah D. C., *Trans. Iron Steel Soc.*, 13 (1986), 35-46.
- 25 Boucly J, Oudin J, Ravalard Y.: Simulation of Ring Rolling with New Wax-based Model Material on a Flexible Experimental machine, *J. of Mech. Work. Technology*, v. 16, 2, 1988, 119-143.
- 26 Brill K.: Plastillin und Natrium als Modell-werkstoffe, *Ann. of CIRP* v.12, 2, 1963, 69-74.
- 27 Cacko R., Czyżewski P.: Analiza numeryczna procesu bezotworowego nitowania – SPR, *FiMM 2003*, Warszawa, 175-180.
- 28 Cacko R.: The influent of different components on the C and n values for wax compositions based on filia, *The Technical Universitet of Denmark Institute of Manufacturing Engineering*, Spring 1994, 29-33.
- 29 Chen C.C., Kobayashi S., Rigid Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, *Application of Numerical Methods to Forming Processes*, ASME, ADM, 28, 1978, 163-174.
- 30 Chijiwa K., Hatamura Y., Hassegawa N., *Trans. Iron. Steel Inst.. Jpn.*, 21, 1984, 178-186.
- 31 Cho J.R., Bae W.B., Kim Y.H., Choi S.S., Kim D.K.: Analysis of cogging process for heavy inglots by finite element method and physical modeling method, *Journal. of Mech. Work. Technology*, 80-81, 1998, 161-165.
- 32 Ciżkov Ju. M.: Teoria podobia i modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem, *Metallurgia*, Moskva, 1970.
- 33 Danckert J, Wanheim T.: Model-Material Technique Applied in Analysis of the Forging of Specimen of Complicated Shape, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 6, 1977, 1985-190.
- 34 Danckert J, Wanheim T.: Slipline Wax, *Experimental Mechanics*, 16, 1976, 318-320.
- 35 Dick W.J., Rice W.B.: Effects of Hydrostatic Pressure on the Behaviour of Wax Used to Model Hydrostatic Extrusion of "Brittle" Materials, brak danych.
- 36 Dobrucki W., Odrzywołek E.: Współzależność między tarcieniem na powierzchni styku z materiałem odkształcanym plastycznie i sposobem płynięcia jego warstw wewnętrznych, *Obróbka Plastyczna Metali*, nr19, 1980, 67-74.
- 37 Dobrzyński L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, *Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002, 947-1042.
- 38 Dolph P., De Chiffire L.: Physical modeling of cut welding, *Journal. of Mech. Work. Technology*, 51, 1995, 131-149.
- 39 Drabol H.: Filia tilsat Kaolin og Kridt, *The Technical Universitet of Denmark Institute of Manufacturing Engineering*, Internal report, (po duńsku), 1993, 54-55.
- 40 Dupuis J.F., Villemaire J.P., Felder E.: Capillary rheometer measurement of plasticine used in order to simulate the hot extrusion metals, *Journal. Mater. Process. Technology*, 43, 1994, 237-257.
- 41 Dziadowski E., Ławrusiewicz S.: Problemy numerycznego modelowania procesów bazujących na ścinaniu, *FiMM 2005*, Warszawa, 145-150.
- 42 Ehrenstein G. W.: *Polymeric Materiale, Structure – Properties – Applications*, Hanser, Muniach 2001.
- 43 Engel L., Klingele H., Stein G., Schaper H.: *Rasterelektronenmikroskopische Untersuchugen von Kunststoffschäden*. Carl Hanser Verlag, München-Wien 1978.
- 44 Farzad A., Blazynski T.Z.: Geometry Factor and redundancy Effects in Extrusion of Rod, *J. of Mech. Work. Technology*, v. 19, 1989, 357-372.
- 45 Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, Warszawa, 1977.
- 46 Finer S., Kivivuori S., Kleemola H.: *Mechanical and Thermal Properties of Model Materials. Part1. Model Wax (Filia)*, *Mekaniska och Termiska Egenskaber av Modellmaterial. Del 1.: Modellvaxet Filia*, Report, Metall. Lab., Metallmansgraenden 4 02150 Espoo 15, Finland, V16N4, 1982.
- 47 Finèr S., Kivivuori S., Kleemola H.: Stress-Strain Relationships of Wax-based Model Materials, *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 12, No. 2, 269-277.

- 48 Fricker D.C., Wanheim T.: Low Friction Coefficient Estimation for Model Material Experiments, *Wear*, 27, 1974, 303-317.
- 49 Gabryszewski Z., Gronostajski J.: *Mechanika Procesów Obróbki Plastycznej*, PWN Warszawa, 1991
- 50 Garner J.N., Rice W.B: Prediction of Conditions of Central Bursting in Hydrostatic Extrusion, *Annals CIRP* 24 (1976).
- 51 Gawad J., Szeliga D.: Algorytmy genetyczne w obliczeniach odwrotnych do interpretacji wyników próby spęcznienia pierścieni, *Materiały 9. Konferencji Informatyka w Technologii Metali, KomPlasTech 2002*, Szczawnica.
- 52 Geen A. P.: On Unsymmetrical Extrusion in Plain Strain, *J. Mech. Phys. Solids*: 1955, 8, 189-196.
- 53 Ghosh S.K.: *CAD/CAM & FEM in Metal Working*, North Staffordshire Polytechnic Beaconside, Stafford, UK, Pergamon Press, 1988.
- 54 Gingher G.C., Padjen G.: Hot Strip Mill Edging Practices and Plasticine Modelling, 34th MWSP Conf. Proc., ISS-AIME, 1993, t.30, s.3-12.
- 55 Glibbery S.J., Wanheim T.: Physical Modelling of Metal Extrusion Processes, *Int. Conf. on Extrusion Proceedings*, Athens 1989, 1-19.
- 56 Glibbery S.J.: Geometrical Analysis of 3-D Forming Processes Using Model Material and Image Processing Techniques, Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Processing of Materials, Technical University of Denmark, 1993.
- 57 Gouveia B.P.P.A., Rodrigues J.M.C, Martins P.A.F. Bay N.: Physical and numerical simulation of the round-to-square forward extrusion, *Journal. of Mech. Work. Technology*, 112, 2001, 244-251.
- 58 Gronostajski Z., Hawryluk M.: Analiza procesu wyciskania współbieżnego w płaskim stanie odkształcania przy pomocy modelowania matematycznego i fizycznego. *Materiały konferencyjne KomPlasTech 2005, Ustroń 2005*, 127-133.
- 59 Gronostajski Z., Hawryluk M.: Materiały stosowane w modelowaniu fizycznym, *Materiały konferencyjne FiMM 2003, Warszawa 2005*, 127-132.
- 60 Gronostajski Z., Hawryluk M.: Modelowanie fizyczne procesu wyciskania współbieżnego aluminium w płaskim stanie odkształcania. *Materiały konferencyjne FORMING 2004, Strbske Pleso 2004*, 75-80.
- 61 Gronostajski Z., Hawryluk M.: Określenie możliwości zastosowania nowego opisu matematycznego warunku podobieństwa plastycznego materiału w modelowaniu fizycznym procesów kształtowania plastycznego, *Materiały konferencyjne FiMM 2003, Warszawa 2005*, 115-120.
- 62 Gronostajski Z., Hawryluk M.: Wpływ warunku podobieństwa w zakresie plastycznym na modelowanie fizyczne osiowoosymetrycznego wyciskania przeciwbieżnego, *Materiały Konferencji Fizyczne i Matematyczne Modelowanie Procesów Obróbki Plastycznej, Warszawa, 2003*, 25-30.
- 63 Gronostajski Z., Niechajowicz A.: Conception of near net shape forming system for massive processes design, *J. of Optimisation of the Design and Technologies in the Machines Construction Field*, Romanian Academy, Branch Office of IAȘI, Bacau, November 2001, 327-333.
- 64 Gronostajski Z., Niechajowicz A.: Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów kształtowania plastycznego, *Materiały IV Konferencji: Zastosowanie Komputerów w Zakładach Przetwórstwa Metali, Ustroń-Jaszowiec: 1997*, 62-69.
- 65 Gronostajski Z.: Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów kształtowania plastycznego, rozdział w monografii pt. *Informatyka w Technologii Metali*, red. A. Piela, F. Grosman, J. Kusiak i M. Pietrzyk, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003, 213-256.
- 66 Gronostajski Z.: Porównanie wyników modelowania matematycznego i fizycznego procesów wyciskania w różnym stanie odkształcenia materiału modelowego, *Mat. 10 Konf KomPlasTech'2003*, *Informatyka w Technologii Metali, Wisła-Jawornik, 2003*, 177-184.
- 67 Grosman F., Kusiak R.: Dobór reprezentatywnego obszaru do analizy wpływu parametrów kształtowania plastycznego na rozwój mikrostruktury w próbie ściskania, *FiMM 2003, Warszawa*, 127-132.
- 68 Hawryluk M.: *Koncepcja Laboratorium do Modelowania Fizycznego*, Praca magisterska, Wrocław 2001.
- 69 Hertel H.: *Modelltechnische Untersuchung der Fließvorgänge beim Strang- und Gesenkpresse*,

- Automobil Industrie, 11, Aug. 25, 1966, 3-12.
- 70 Hollomon J.H.: Tensile deformation, Trans. AIME, 162, 1945, 268–290.
- 71 Holmquist J.K.: Investigation of the Piercing Process by Means of Model Wax billets, Iron and Steel Eng., Dec. 1952, 53-68.
- 72 Horno H., Ujiro N., Shinji M. Compression test of Plasticine as a model of forging material. Bull. Univ. Osaka Prefect nr 2, 1968.
- 73 Itoh M. Determination of Forming Limits of Thick Sheet in Compression Bending by Using Model Material, The Technical University of Denmark Institute of Manufacturing Engineering, Internal report, 1987.
- 74 Itoh M. Determination of Forming Limits of Thick Sheet in Compression Bending by Using Model Material, The Technical University of Denmark Institute of Manufacturing Engineering, J. of Mech. Work. Technology, 1985, t.12, 269-277.
- 75 Jones C.L.: The Examination of Waxes, paint Technology, v. 21, 20, 1957, 9-13.
- 76 Kowalczyk L.: Modelowanie fizyczne procesów obróbki plastycznej, ITE, Radom 1996.
- 77 Kut S., Stachowicz F.: Badania eksperymentalne i symulacja numeryczna wykrawania ze wstępnym wygięciem półwyrobu, FiMM2005, Warszawa, 57,62.
- 78 Kuziak R., Zalecki W., Węglarczyk S., Pietrzyk M.: Symulacja uzyskiwania struktur ultradrobno ziarnistych i nanokrystalicznych metodą skumulowanego odkształcenia plastycznego, FiMM 2003, Warszawa, 145-150.
- 79 Lange, K.: A System for Investigation of Metal Forming Processes. Proc.10th MTDR Conf. Manchester 1969.
- 80 Lee R.S, Blazynski T.Z.: Mechanical Properties of a Composite Wax Model Material Simulating Plastic Flow of Metals, Journal. Of Mech. Work. Technology, 9, 1984, 301-312.
- 81 Leonard J.G, Pietrzyk M., Cser L.: Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products, Elsevier, Amsterdam, 1999.
- 82 Liu Yuli, Du Kun, Zhan Mei, Yang He, Zhang Fuwei: Physical modeling of blade forging, J. of Mat. Proc. Techn., 99, 2000, 141-144.
- 83 Mantyla M.: Parametric and feature based CAD/CAD, Concepts, Techniques and Applications. John Wiley and Sons, 1995.
- 84 Markowski J., Knapiński M.: Numeryczna analiza fizycznego modelowania procesu walcowania wyrobów płaskich na gorąco, FiMM 2005, 121-126.
- 85 Maropoulos P. G.: Review of research in tooling technology, process modelling and process planing. Part II: Process planing. Computer Integrated Manufacturing Systems, 8, nr 1, 1995, 13-20.
- 86 Masey F., Trans. Manchester Assoc. Eng., 1921/22, 21-56.
- 87 Meidert M., Knoerr M, Westphal K., Altan T.: Numerical and physical modeling of cold forging of bevel gears, J. of Mech. Work. Technology, v. 33, 1992, 75-93.
- 88 Milenin A., Dyja H., Muskalski Z.: Modelowanie MES wpływu zmiany kierunku ciągnięcia między przepustami na końcowy rozkład odkształceń na przekroju walcówki, FiMM 2003, Warszawa, 85-90.
- 89 Misiolek W.Z.: Material physical response in the extrusion process, J. of Mat. Proc. Techn., 60, 1996, 117-124.
- 90 Mróz S., Dyja H., Szota P.: Numeryczne modelowanie procesu walcowania prętów z wzdłużnym rozdzielaniem pasma, FiMM 2003, Warszawa, 61-66.
- 91 Muller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego, WNT Warszawa 1968.
- 92 Muster A., Presz W.: Ocena tarcia i zacierania w warunkach modelowania fizycznego. Materiały konferencyjne FiMM 2003, Warszawa 2003, 1-6.
- 93 Niżnik B., Pietrzyk M., Fizyczna i numeryczna symulacja odkształcania stali z mikrodotadkiem niobu w zakresie dwufazowym, FiMM 2005, Warszawa, 7-12.

- 94 Oudin J., Ravalard Y., Rommens S.: On the contribution of waxes to the simulation of metal forming processes, North American Manufacturing Research Conference Proceedings, v.8, 1980, 166-170.
- 95 Pater Z.: Modelowanie numeryczne przemysłowych procesów walcowania poprzeczno-klinowego, FiMM 2003, Warszawa, 97-102.
- 96 Pertence A.E.M., Cetlin P.R.: Similarity of ductility between model and real materials, J. of Mat. Proc. Techn., 103, 2000, 434-438.
- 97 Petersen S.B., Martins P.A.F., Bay N.: An Alternative Ring Test Geometry for Evaluation of Friction under Low Normal Pressure, J. Mat. Processing Technology, 79, 1998, 14-24.
- 98 Petersen S.B., Martins P.A.F., Bay N.: Friction in Bulk model Forming: a General Friction Model vs. The Law of Constant Friction, J. Mat. Processing Technology, 66, 1997, 186-194.
- 99 Piela A., Zimniak Z.: Symulacja metodą elementów skończonych procesu tłoczenia blach typu Tailored Blanks na przykładzie próby miseczkowania, KomPlasTech, Krynica-Czarny Potok, 2000, 223-232.
- 100 Pietrzyk M., Lenard J. G.: Finite element simulation during metal forming processes, Proc. of Int. Heat Transfer Conf., Jerusalem, 1990.
- 101 Pietrzyk M.: Comp_axi – komputerowy program do symulacji plastometrycznej próby spękania próbek osiowosymetrycznych, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 60, 1993, 190-197.
- 102 Pindera J.T.: Reologiczne własności materiałów modelowych, WNT Warszawa 1962.
- 103 Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn, Warszawa, PWN 1977.
- 104 Presz W., Prejs T.: Wpływ kształtu wstępniaka na siły boczne w procesie spękania swobodnego materiału modelowego. Fizyczne i Matematyczne Modelowanie Procesów Obróbki Plastycznej, Warszawa: 2001, 13-19.
- 105 Presz W.: Modelowanie fizyczne jako metoda weryfikacji obliczeń numerycznych. Materiały konferencyjne FiMM 2003, Warszawa 2003, 19-24.
- 106 Presz W.: Proces bazowy dla numerycznego modelowania objętościowego mikro-kształtowania plastycznego, FiMM 2005, 77-82.
- 107 Rembold U.: Computer Aid Design and Manufacturing, Springer-Verlag, 1988.
- 108 Rusinski E., Czmochoński J., Smolnicki T.: Zaawansowane metody elementów skończonych w konstrukcjach nośnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław, 2000.
- 109 Rusiński E., Smolnicki T., Karoliński J.: Numeryczne symulacje badań niszczących konstrukcji ochronnej dla samochodu Toyoty. Samochody specjalne, nr 2, 1998.
- 110 Sadłowska H., Kocańda A.: Zastosowanie kryteriów utraty stateczności w symulacji komputerowej rozpękania hydromechanicznego trójkątów, FiMM 2005, Warszawa, 39-44.
- 111 Samołyk G.: Nowa technika symulacji procesu kucia matrycowego, FiMM 2003, Warszawa, 31-36.
- 112 Schopfer M.P.J., Zulauf G.: Strain-depend rheology and memory of plasticine, Tectonophysics 354 (2002) 85-99.
- 113 Seachtling H.: Tworzywa sztuczne. WNT, Warszawa 2000.
- 114 Shen G., Vedhanayagam A., Kropp E., Altan T.: A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging, Journal. of Mech. Work. Technology, 33, 1992, 109-123.
- 115 Shida S., Awazuhara Y., Yasuda K., Tsumura S., Trans. Iron Steel Inst..Jpn., 19, 1979, 700-706.
- 116 Shin H., Kim D., Kim N.: A simplifield three-dimensional Finie-elemnt analysis of the non-axisymetrical extrusion processes, J. of Mat. Proc. Techn., 38, 2000, 567-587.
- 117 Shin H.W., Kim D.W., Kim N.: A Study on the Rolling of I-Section Beams, Int. J. Mach. Tools Manufact., 1994, t.34, nr2, s. 147-160.
- 118 Siedow L. I.: Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice. WNT Warszawa 1968.
- 119 Sińczak J., Łukaszek-Sołek A., Bednarek S.: Fizyczne i numeryczne modelowanie procesu kucia korby wału, FiMM 2005, 133-138.
- 120 Smolnicki T. „Zastosowanie metod numerycznych do analizy nieliniowych układów dynamicznych” –

wykład habilitacyjny.

- 121 So H., Lin Y.F., Huang K.W: Comparison of flow patterns between plasticine and aluminium alloys in hot-precision forging, *J. of Mat. Proc. Techn.*, 66, 1997, 39-48.
- 122 Sofuoğlu H., Rasty J.: Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes, *Tribology International* 33 (2000), 523-529.
- 123 Sofuoğlu H., Rasty J.: On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test, *Tribology International* 32 (1999), 327-335.
- 124 Steller R, Bryjak M., Informacja prywatna.
- 125 Świątkowski K Analiza badań modelowych z użyciem materiałów woskowych, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. V, 5, 1994, 5-14.
- 126 Świątkowski K.: Badania nad uzyskaniem nowego materiału modelowego, bazującego na plastelinie, *Materiały konferencyjne FiMM 2001*, Warszawa 2001, 5-11.
- 127 Świątkowski K.: Modellermaschinen zum Simulieren des Strangpressprozesses, *Bänder Bleche Rohre*, 31, 10, 1990, 52-59.
- 128 Świątkowski K.: Ocena możliwości wykorzystania niemetalicznych materiałów modelowych w procesach przeróbki plastycznej metali. *Rudy Metali* R.44,4, 1999, 167-171.
- 129 Świątkowski K.: Ocena Wyników Eksperymentów Modelowania Fizycznego, *Materiały konferencyjne FiMM 2001*, Warszawa 2001, 29-36.
- 130 Świątkowski K.: Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia, *Obróbka Plastyczna Metali*, nr1, 2000, 21-30.
- 131 Świątkowski K.: Własności mechaniczne woskowych materiałów modelowych, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. V, 5, 1994, 15-22.
- 132 Świątkowski K.: Zastosowanie procesu wyciskania dla uzyskania walcowych próbek z niemetalicznych materiałów modelowych, *Rudy Metale*, R. 48, 2003, 368-371.
- 133 Świłło S., Kocańda A.: Techniki numerycznej analizy obrazu w metodach doświadczalnych pomiaru odkształceń i badania kształtu, *Przegląd Mechaniczny* 3, 2000, 19-25.
- 134 Świłło S.: Automatyzacja pomiaru odkształceń z wykorzystaniem numerycznej analizy obrazu. Praca doktorska, PW, 1999.
- 135 Szczepanik S., Piątkowska K. Franze M.: Modelowanie numeryczne i fizyczne wyciskania współbieżnego, *FiMM 2005*, 139-144.
- 136 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.
- 137 Szota P.: Modelowanie odkształcenia prętów okrągłych z użebrowaniem śrubowym w wykroju gotowym, *FiMM 2005*, Warszawa, 71-76.
- 138 Szyndler D.: Problem odwrotny w zastosowaniu do identyfikacji parametrów procesów plastycznej przeróbki metali, Praca doktorska, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, AGH, Kraków 2001.
- 139 Tennyson R.C., Hansen J.S.: Study of the crash behaviour of aircraft fuselage structures. *Structural Crashworthiness* Butterworth & Co. London 1983.
- 140 Trębacz L., Kuziak R., Pietrzyk M.: Symulacja i interpretacja próby SICO, *FiMM 2005*, Warszawa, 91-96.
- 141 Tresca H.: Sur l'écoulement des corps solides soumis a de fortes pressions, *C. R. Acad. Sci. Paris* 59 (1864 II) 754.
- 142 Trusov P.V.: O razlozhenii dvizheniya i opredelajushhih sootnoszenijah v geometricheski nelinejnoj teorii plastichnosti. Perm`. PPI, 1987.
- 143 Tsukamoto H., Egawa T., Ibushi J., Oomori S., Yagishita K.: Simulative Model Test on Metal Forming Using Plasticine as a Model Material, *Technical paper MF74-179*, USA 1974.
- 144 Vazquez V., Altan T.: New concepts in die design — physical and computer modeling applications, *J. of*

- Mat. Proc. Techn., 98, 2000, 212-223.
- 145 Vazquez V., Sweeney K., Wallace D., Wolff Ch., Ober M., Altan T.: Tooling and process design to cold forge a cross groove inner race for a constant velocity joint - physical modeling and FEM process simulation, J. of Mat. Proc. Techn., 59, 1996, 144-157.
 - 146 Wallero A.: Closing of Porosities in Hot Rolling, J. of Mat. Proc. Techn., 1985.
 - 147 Wanheim T.: Trends in Physical Simulation of Metal Working Processes, Paper, The 4th Cairo University Conference on Mechanical Design And Production, 27-29 dec. 1988, Cairo University, Egypt: 1988.
 - 148 Wanheim, T.: Physical Modelling of Metalprocessing, Procesteknisk Institut, Laboratories for Mekaniske Materialeprocesser, Danmarks Teknisk Højskole, Denmark, 1988.
 - 149 Ward J.M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. PWN, Warszawa 1975.
 - 150 Warth A.H.: The Chemistry and Technology of Wax, 1947, 871-888.
 - 151 Wong S.F., Hodgson P.D., Chong C.J., Thomson P.F.: Physical modelling with application to metal working, especially to hot rolling, Journal. of Mech. Work. Technology, 62, 1996, 260-274.
 - 152 Wroński W.S. (red): Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali. Lublin. Wyd. Politechniki Lubelskiej 2004.
 - 153 Yoshida F, Wanheim T.: Teh Metod for the 3-D Strain and Strain Rate Analyses in Viscoplasticity. Ann. of the CIRP, v.37, 1, 1988, 221-224.
 - 154 Young-Hoon Moon, Myung-Sik Chun, Joon-Jeong Yi, Jong-Keun Kim.: Physical Modelling of Edge Rollin in Plate Mill with Plasticine, Steel Research, 1993, t.64, nr 11, 557-563.
 - 155 Zhan Mei, Liu Yuli, He Yang: Physical modeling forging of blade with a zdampner platform using plasicine , J. of Mat. Proc. Techn., 117, 2001, 62-65.
 - 156 Zienkiewicz O. C.: Finite Element Method, McGraw Hill, 1977.
 - 157 Zjuzin W. I.: Sbornik trudov, WNII Metmasz Moskwa nr 8, 1963.
 - 158 Żuchowska D.: Polimery konstrukcyjne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995, 2000.