# ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

JAN ŁUKOWSKI

Elterar E

# KSZTAŁTOWANIE PLASTYCZNE MATERIAŁÓW POROWATYCH

# HUTNICTWO



# POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1157



# KSZTAŁTOWANIE PLASTYCZNE MATERIAŁÓW POROWATYCH

GLIWICE

OP!NIODAWCY Prof. dr hab. inż. Franciszek Grosman Prof. dr hab. inż. Józef Zasadziński

#### KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY	—	Prof.	dr	hab.	inż.	Jan	Bandr	owski
REDAKTOR DZIAŁU		Doc.	dr	hab	inż.	Sta	nisław	Serkowski
SEKRETARZ REDAKCJI	—	Mgr	Elż	bieta	Leś	0		

REDAKCJA Mgr Aleksandra Kłobuszowska

### REDAKCJA TECHNICZNA Alicja Nowacka

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0324-802X

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

 Nakl. 150+83
 Ark. wyd. 7
 Ark. druk. 7,313
 Papier offset. kl. III 70x100, 70 g

 Oddano do druku 17.03.92
 Podpis. do druku 17.03.92
 Druk ukończ. w kwietniu 1992

 Zam. 115/92
 Cena zł 9.800,

Fotokopie, druk i oprawę

wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

# SPIS TREŚCI

Wykaz	najważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy	9
Wstęp		3
I. STU	DIA LITERATUROWE 1	15
1.1.	Uwagi wstępne 1	15
1.2.	Charakterystyka metod kształtowania przedkuwek spiekanych 1	8
1.3.	Wpływ parametrów procesu technologicznego na własności odkuwek 2	22
	1.3.1. Wpływ geometrii spiekanej przedkuwki na własności odkuwek 2	24
	1.3.2. Klasyfikacja odkuwek ze spieków 2	27
	1.3.3. Porównanie procesów kształtowania na zimno i na gorąco odkuwek	
	ze spieków	31
1.4.	Matematyczne modelowanie procesów płynięcia plastycznego spieków . 3	31
	1.4.1. Warunki plastyczności materiałów porowatych	31
	1.4.2. Metody matematycznego rozwiązywania zagadnień plastycznego	
	płynięcia	12
	1.4.3. Przegląd metod oceny nierównomierności odkształceń materiałów	
	porowatych	+4 4 0
1.5.	Podsumowanie przeglądu literatury	ŧo
		<b>C</b> 1
2. ZAł	LOZENIA I TEZA PRACY	21
		~ =
3. BAI	DANIA WLASNE	22
3.1.	Program badan	23
	3.1.1. Dobór materiałów do badań	53
	3.1.2. Dobór sposobu kształtowania	56
	3.1.3. Warunki prowadzenia prób kształtowania	57
3.2.	Metodyka badań	58
	3.2.1. Ocena rozmieszczenia porowatości	58
	3.2.2. Określenie odkształcalności granicznej	58
3.3.	Symulacja komputerowa płynięcia plastycznego materiałów porowatych .	59
	3.3.1. Metodyka badania modelu matematycznego	61
	3.3.2. Podstawowe założenia modelu	65

	3.3.3. Opis programu obliczeniowego	69
	3.3.4. Statystyczna weryfikacja modelu	69
4.	. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ	73
	4.1. Materiał wsadowy	73
	4.2. Próby kształtowania	78
	4.3. Symulacja komputerowa procesów płynięcia materiałów porowatych	101
	4.4. Ocena statystyczna zgodności wyników badań symulacyjnych z wynikam eksperymentu	i 105
5.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	107
6.	LITERATURA	109
ST	TRESZCZENIE	115

# CONTENTS

Lis	st of	symbol	s
Int	rodu	ction .	
1.	LITE	ERATU	RE REVIEW
	1.1.	Introdu	actory remarks
	1.2.	Techni	ques of the forming of sintered preforms - a characteristics 18
	1.3.	The in	fluence of the technological process parameters on the properties of
		forging	zs
		1.3.1.	Effect of the preform geometry 24
		1.3.2.	Classification of sintered forgings 27
		1.3.3.	Comparison of the cold and hot forming processes
	1.4.	Mather	matical modelling of plastic flow of porous materials 31
		1.4.1.	Conditions for plasticity of porous materials 31
		1.4.2.	Methods of mathematical analysis of plastic flow problems 42
		1.4.3.	A review of methods for evaluation of inhomogeneity of porous
			materials deformation
	1.5.	Conclu	sions of the literature review
2.	ASS	UMPTI	ONS AND THE THESIS OF THE WORK
3.	THE	AUTH	IOR'S RESEARCH WORK 53
	3.1.	The re	search programme
		3.1.1.	Selection of the materials for investigations
		3.1.2.	Selection of the forming method
		3.1.3.	Conditions of the forming tests
	3.2.	The re-	search methodology
		3.2.1.	Evaluation of the porosity distribution
		3.2.2.	Determination of the deformability limit
	3.3.	Compu	iter simulation of the plastic flow of porous materials
		3.3.1.	The mathematical model investigation methodology 61
		3.3.2.	Fundamental assumptions of the model

3.3.3. Description of the calculating programme	1
3.3.4. Statistical verification of the model	1
4. ANALYSIS OF THE RESULTS	6
4.1. Charge material	;
4.2. Forming trials	)
4.3. Computer simulation of the porous material plastic flow processes 101	
4.4. Statistical assessment of the agreement between the simulation and experimental results	á
5. RECAPITULATION AND CONCLUSION 107	r
6. BIBLIOGRAPHY 109	F
SUMMARY	5

# INHALTSVERZEICHNIS

Lis	ste de	er Bez	ichnungen 9
Eir	aleitu	ing	
1.	Prob	lemstel	llung
	1.1.	Einfüh	rungsbemerkungen
	1.2.	Charak	cteristik der Methoden des Sinterschmiedens
	1.3.	Einflu	ß der technologischen Parameter auf die Eigenschaften der
		Schmie	edestücke
		1.3.1.	Einfluß der Geometrie des Rohteils 24
		1.3.2.	Klassifizierung gesinterter Schmiedestücke 27
		1.3.3.	Vergleich der Kalt - und Warmumformung
	1.4.	Mathe	matische Modellierung des plastischen Fließens der Sinter 31
		1.4.1.	Veraussetzungen der Plastizität der Sinter
		1.4.2.	Methoden der mathematischen Lösung der Probleme des plastischen
			Fließens
		1.4.3.	Übersicht über die Methoden der Inhomogenität der Deformation in
			den Sintern
	1.5.	Schluß	folgerungen
2.	THE	ESEN D	DER ARBEIT
3.	EIG	ENEUN	NTERSUCHUNGEN
	3.1.	Progra	mm der Untersuchungen
		3.1.1.	Auswahl von Proben
		3.1.2.	Auswahl vom Umformungstyp 56
		3.1.3.	Bedingungen der Durchführung der Sinterschmieden 57
	3.2.	Metho	dik der Untersuchungen
		3.2.1.	Bestimmung der Verteilung der Porosität
		3.2.2.	Bestimmung der Grenzdeformation
	3.3	Komo	itersimulation des plastischen Eließens des Sinters 59
	0101	331	Methodik der Analyse des mathematischen Modells
		337	Grundlegende Voraussetzungen des Modells
		، معاد ال و الو	otatione totansorranten and monomo

	3.3.3. Beschreibung des Berechnungsprogramms
	3.3.4. Statistische Verifizierung des Modells
4.	BESCHREIBUNG DER ERGEBNISSE
	4.1. Ausgangsmaterial
	4.2. Sinterschmieden
	4.3. Komputersimulation des plastischen Fließens des Sinters 101
	4.4. Statistische Bestimmung der Übereinstimmung der Ergebnisse der Simulation mit den experimentellen Daten 105
5.	ZUSAMMENFABUNG UND SCHLUBFOLGERUNGEN 107
6.	LITERATURVERZEICHNIS 109
ĸ	URZFASSUNG

Wykaz najważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy

Cechy materialu porowatego: A porowatość ( $0 \le \Theta < 1$ ), 19 gęstość względna, θ., gęstość względna - nasypowa, θr gęstość teoretyczna  $\rightarrow \vartheta_T = 1$ , masa właściwa, P moduł Kirchoffa  $G = \frac{E}{2(1+y)}$ , G E modul Younga, moduł ściśliwości  $K = \frac{E}{1-2\nu}$ , K A, udział powierzchniowy nieciągłości, v współczynnik Poissona.

Odkształcenia, przemieszczenia:

$$\varphi_{z}, \varphi_{y}, \varphi_{z}$$

$$U_{ik}$$

$$U_{u} = U_{11} + U_{22} + U_{33}$$

$$\zeta$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ij}\delta_{ij}$$
  
H

Naprężenia, naciski, energia układu:

$\mathbf{J}_1$	-	pierwszy niezmiennik tensora naprężeń,
$J_2$	.5.	drugi niezmiennik dewiatora naprężeń,
$\sigma_{ik}$	-	składowe tensora naprężeń,

składowe tensora odkształceń,

- składowe tensora przemieszczeń,
- odkształcenie objętościowe,
- współczynnik odkształcenia w kierunku promieniowym,
- prędkość odkształcenia objętościowego,
- intensywność prędkości odkształcenia postaciowego,
- składowe wektora prędkości płynięcia,
- przyrost odkształcenia,
- przyrost odkształcenia ekwiwalentnego.

$\sigma_{pl}$	- naprężenie uplastyczniające,
σο	- średni nacisk normalny,
dσ	- przyrost naprężenia,
$p = \frac{1}{3}\sigma_{ik}\delta_{ki} = \sigma_m$	- ciśnienie hydrostatyczne (naprężenie
	średnie),
F	- energia swobodna układu,
F <sub>OB</sub>	<ul> <li>składowa objętościowa energii swobod- nej układu,</li> </ul>
$F_{\bullet}$	<ul> <li>składowa postaciowa energii swobodnej układu,</li> </ul>
J	- funkcjonał mocy.

Wielkości liniowe, powierzchniowe, objętości:

S	- powierzchnia rozpatrywanego obiektu,
V <sub>s</sub>	<ul> <li>objętość materiału porowatego,</li> </ul>
V	<ul> <li>objętość nieciągłości,</li> </ul>
Vo	<ul> <li>objętość osnowy,</li> </ul>
r	<ul> <li>promień środka ciężkości elementu wzaleden osi symetrij</li> </ul>
	względein osi symetrii.

Stałe i współczynniki:

η, λ

χ

n

m

10

wej podatności spieku do odkształceń, - współczynnik swobodnego płynięcia

 podatność materiału osnowy do umacniania podczas przeróbki plastycznej na zimno,

współczynniki postaciowej i objętościo-

wykładnik potęgowy przyjmujący dla spieków z proszków żelaza wartości od 3 do 6 [41].

 macierz pochodnych funkcji kształtu elementu,

macierz tłumienia,

promieniowego,

Macierze:

**[B]** 

[C]

[K]			macierz sztywności elementów, będąca sumą macierzy dla poszczególnych
			elementów,
[M]		-	macierz masowa.
Т			znak transponowania macierzy,
Wielkości	statystyczne:		
$(\bar{A}_{A})$	i I	-	średni udział powierzchniowy nie- ciągłości w i-tym polu próbki modelo- wej,
$(A_{\lambda})$	U U		udział powierzchniowy porów w i-tym polu j-tej próbki modelowej,
$(\bar{A}_{A})$	e. i		średni udział powierzchniowy nie- ciągłości w i-tym polu próbki eks- perymentalnej,
$(A_{\lambda})$	Ů	-	udział powierzchniowy porów w i-tym polu j-tej próbki eksperymentalnej,
$D_i$		-	wskaźnik lokalnego dopasowania wyników obliczeń do wyników eksperymentu,
$N_p$		-	liczba danych eksperymentalnych mieszczących się w przedziale ufności,
<i>S</i> ; <sup><i>m</i></sup>			odchylenie standardowe i-tego pola próbki modelowej.
Inne:			
α. 6			funkcje porowatości materiału.
δ.,		-	symbol Kroneckera
W.		_	współczynnik płyniecia bocznego
po			subborondymine bryingene bootinego.
Indeksy			
			wielkości charakterwaniece meteriał
5			borowaty.
0 <i>i</i>	-k	1	początkowa, bieżąca i końcowa wartość
1			wielkości charakterwzniace meteriał lity
5			wielkości obaraktoryzujące materiał III.
m		10 J	modelowe.
е		-	wielkości charakteryzujące próbki
			eksperymentalne,

Próba przedstawienia wielorakich własności ciał plastycznych za pomocą tylko jednego modelu matematycznego nie rokuje nadziei na powodzenie.

W. Prager

#### Wstęp

Poszukiwanie materiałooszczędnych i efektywnych technik wytwarzania detali o zróżnicowanych własnościach końcowych spowodowało szybki rozwój metalurgii proszków jako technologii w wielu przypadkach bardziej oszczędnej i mającej większe możliwości niż klasyczne procesy przeróbki plastycznej, odlewnictwa, nie mówiąc o obróbce skrawaniem. Szersze stosowanie wyrobów produkowanych tą technologią zależy jednak od polepszenia ich własności eksploatacyjnych. Do niedawna czynnikiem ograniczającym stosowanie kształtek spiekanych była ich stosunkowo niska wytrzymałość na rozciąganie, osiągająca w przypadku tradycyjnych spieków stalowych wartości do ok. 500 MPa przy gęstości do 6,8 g/cm<sup>3</sup>, dogęszczanie spieków poprzez kucie bądź prasowanie pozwala na uzyskanie wytrzymałości powyżej 850 MPa, przy wydłużeniu 10-32% i gęstości powyżej 7,7 g/cm<sup>3</sup>.

Wzrost gęstości i likwidacja nieciągłości wewnętrznych w procesie kształtowania materiału porowatego zależą od lokalnego płynięcia plastycznego materiału, co związane jest ze schematem stanu naprężeń. Stan naprężeń ma więc istotny wpływ na przebieg zagęszczania i likwidację nieciągłości wewnętrznych [50].

Prawidłowy dobór i kontrola parametrów procesów technologicznych mają zasadniczy wpływ na własności końcowe wyrobów. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia podczas przetwórstwa materiałów niekonwencjonalnych, gdzie w wielu przypadkach tempo rozwoju technik wytwarzania uzależnione jest od postępu w badaniach podstawowych. Szersze wdrożenie tych technologii w praktyce przemysłowej uzależnione jest od opracowania i zebrania danych niezbędnych do projektowania procesu, przygotowania produkcji i sterowania parametrami technologicznymi. Ze względu na szeroki zakres baz danych czas dostępu do informacji wydłużył się do tego stopnia, że dotych zasowe podejście do projektowania i prowadzenia procesu (ze względu na tradycyjny sposób przepływu informacji) stało się niewydolne i nieużyteczne. W technologiach określanych umownie "konwencjonalnymi" problem ten, ze względu na długoletnie doświadczenia w ich stosowaniu, ma mniejsze znaczenie.

W nowoczesnych technologiach utrudnione jest wytwarzanie wyrobów o powtarzalnych i optymalnych dla danego materiału i procesu własnościach bez wspomagania komputerowego. Szersze wdrożenie tych technik w przemyśle wymaga przeprowadzenia badań obejmujących między innymi opracowanie modeli fizykalnych zjawisk, metod weryfikujących poprawność uzyskanych rozwiązań oraz zebranie niezbędnych do weryfikujących poprawność uzyskanych rozwiązań oraz zebranie niezbędnych do weryfikujących w procesie kształtowania objętościowego spieków. Obecnie projektowanie zarówno kształtu przedkuwek spiekanych, jak i technologii procesu odbywa się w sposób intuicyjny lub z wykorzystaniem zasad obowiązujących w klasycznych technologiach obróbki plastycznej nie uwzględniających specyfiki materiału porowatego. Wprawdzie w pracach [3-11; 17-19; 34; 98-102] przedstawiono zasady i warunki kształtowania plastycznego spieków, to jednak brakuje prac syntezujących problem oraz umożliwiających opracowanie programów i zebranie baz danych niezbędnych do komputerowego wspomagania procesu produkcyjnego.

Zamierzeniem tej pracy jest usystematyzowanie i analiza dotychczasowych poglądów dotyczących procesów kształtowania objętościowego na zimno metalicznych materiałów porowatych, opracowanie modelu pozwalającego na symulację płynięcia plastycznego w procesach kucia odkuwek osiowo-symetrycznych. W celu ustalenia stopnia dopasowania modelu do przebiegu procesów rzeczywistych niezbędne jest opracowanie metod umożliwiających eksperymentalną weryfikację modelu. Wymaga to między innymi zebrania i uporządkowania zawartych w literaturze danych, przeprowadzenia teoretycznej i eksperymentalnej analizy procesu. Uzyskane w trakcie realizacji pracy wyniki badań powinny doprowadzić do lepszego poznania zjawisk występujących podczas plastycznego płynięcia materiałów porowatych, co pozwoli z kolei na opracowanie racjonalnych z sad projektowania procesów kształtowania na zimno spieków oraz umożliwi ich szerokie wdrożenie w praktyce przemysłowej.

Prezentowane wyniki są efektem badań prowadzonych w Katedrze Mechaniki i Technologii Przeróbki Plastycznej związanych z plastycznym kształtowaniem materiałów porowatych.

# **1. STUDIA LITERATUROWE**

#### 1.1. Uwagi wstępne

W ostatnim dwudziestoleciu w krajach wysoko rozwiniętych zaczęto szeroko stosować do wytwarzania elementów pracujących w warunkach złożonych obciążeń dynamicznych techniki spiekowe. Spośród technik używanych w przemyśle motoryzacyjnym i elektromaszynowym metoda ta ma największą dynamikę rozwoju (rys. 1.1).



- Rys. 1.1. Dynamika produkcji elementów ze spieków dla wybranych krajów wysoko uprzemysłowionych w latach 1965-1983 [9; 19].
- Fig. 1.1. Production of sintered items in selected advanced countries in 1965-1983 [9; 19].

Wyroby wykonywane techniką spiekową znalazły szczególne zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym jako alternatywne dla niedużych, osiowo symetrycznych odlewów i odkuwek. Na rys. 1.2 przedstawiono wzrost produkcji wyrobów ze spieków na przykładzie przemysłu motoryzacynego Japonii. Wyroby te stosowane są głównie w zespołach przenoszenia napędu.



- Rys. 1.2. Wzrost zastosowania elementów ze spieków w przemyśle motoryzacyjnym w latach 1961-1985 [19].
- Fig. 1.2. Increase in the use of sintered parts in automotive industry in 1961-1985 [19].



- Rys. 1.3. Wykorzystanie elementów ze spieków w głównych zespołach pojazdu samochodowego.
- Fig. 1.3. Application of sintered parts in the main sub-assemblies of a car.

Na rys. 1.3 przedstawiono wykorzystanie elementów ze spieków w poszczególnych podzespołach pojazdów samochodowych (sumaryczny udział wyrobów ze spieków przyjęto jako 100%).

Przeróbka plastyczna spieków, a w szczególności procesy kucia na gorąco i na zimno znacznie zwiększyły udział wyrobów spiekanych w podzespołach pracujących w warunkach wysokich obciążeń dynamicznych. Połączenie metod przeróbki plastycznej z metalurgią proszków, jako techniką przygotowania wsadu o optymalnej z punktu widzenia płyniecia plastycznego geometrii, gwarantuje wytwarzanie elementów o własnościach porównywalnych z odkuwkami konwencjonalnymi.

Możliwość dostosowania geometrii wsadu spiekanego do wymogów kształtowania plastycznego jest najważniejszą, korzystną cechą tej technologii względem kucia konwencjonalnego. Pozwala to na uzyskanie znacznych oszczędności, głównie poprzez:

- mniejsze zużycie materiału,
- niźsze energie kształtowania,
- wieksza trwałość narzedzi.

Zużycie energii w kuźniach matrycowych wynosi średnio ok. 10,8 MJ/kg dla odkuwek średniej wielkości [2] i wynika głównie z niskiej sprawności urządzeń

grzewczych i przestarzałych urządzeń technologicznych (młoty). Przy optymalnym doborze parku maszynowego zużycie energii można zmniejszyć o połowę. Jest to jednak kilkakrotnie więcej w porównaniu Z prasowaniem na zimno, gdzie zużycie energii waha sie w granicach 0,36 -1,8 MJ/kg [46].

Przeróbka plastyczna materialów spiekanych jest procesem stosowanym w różnych odmianach technologicznych (rys. 1.4). Z przeprowadzonej analizy literaturowej [7; 8; 11; 13; 14; 34] można kształtowania wnioskować, że do plastycznego spieków znalazły zastosowanie przede wszystkim procesy kucia i prasowania na goraco lub na zimno. Procesy wyciskania, walcowania i prasowania izostatycznego stosowane są w bardzo ograniczonym zakresie, głównie do wytwarzania materiałów i wyrobów o specjalnych Rys. 1.4. Klasyfikacja metod obróbki własnościach. Na rys. 1.5 przedstawiono porównanie operacji w procesie kształto- Fig. 1.4. Classification of forming of wania odkuwek matrycowych z proszków spiekanych i ze stali konwencjonalnych.



- plastycznej półwyrobów.
  - semifinals.



- Rys. 1.5. Porównanie operacji kucia odkuwek z proszków spiekanych i materiałów konwencjonalnych.
- Fig. 1.5. Comparison of manufacture of sintered powder forging with that of conventional materials.

Kucie odkuwek ze spieków dzięki optymalnej z punktu widzenia płynięcia materiału geometrii wsadu charakteryzuje się znacznym ograniczeniem ilości wykrojów, jak również pozwala na wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie operacji wykańczających.

## 1.2. Charakterystyka metod kształtowania przedkuwek spiekanych

Kształtowanie odkuwek w matrycach o stałej szerokości (rys. 1.6) jest zbliżone do procesów zagęszczania proszków. Przekrój przedkuwki w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania nacisku odpowiada przekrojowi gotowej odkuwki. Wzrost gęstości jest spowodowany tylko zmniejszeniem wysokości odkuwki. Wymaga to, ze



Rys. 1.6. Kształtowanie w matrycach o stałej szerokości [17]. Fig. 1.6. Forming in constant width dies [17].

względu na tarcie, dużych nacisków jednostkowych obniżających znacznie trwałość matryc. Odkuwki wytwarzane tym sposobem cechuje również znaczny rozrzut gęstości wywołany nierównomiernym zagęszczeniem w objętości spieku.

Kształtowanie w zamkniętej matrycy (rys. 1.7) jest pewną odmianą omawianej wyżej metody, w procesie tym jednak wywołane jest minimalne promieniowe płynięcie, służące głównie do wypełnienia występów bocznych w matrycy. Stanowi to znaczne ograniczenie możliwych do uzyskania gęstości końcowych odkuwki. Istotny w tym procesie jest również właściwy dobór geometrii i wymiarów przedkuwki, zapewniający wypełnienie wykroju matrycy, jak również odpowiednio wysoką gęstość wyrobu. Przy stosowaniu tej odmiany procesu na prasach korbowych należy zwrócić szczególną uwagę na staranny dobór objętości wsadu (tzw. objętość krytyczna spieku) i wąskie pole tolerancji tej objętości.

Kształtowanie w matrycach z regulowaną objętością w tej metodzie unika się trudności związanych z ustaleniem dokładnej geometrii i wymiarów przedkuwki. Odkuwka kształtowana jest za pomocą stempla po uprzednim zamknięciu wykroju matrycy (rys. 1.8).

Kształtowanie odkuwek poprzez wyciskanie (rys. 1.9) przedkuwka kształtowana jest tą metodą poprzez wyciskanie współbieżne lub przeciwbieżne wsadu w matrycy, podczas kształtowania występuje intensywne płynięcie plastyczne spieku. Od materiału wsadowego wymagana jest więc wysoka plastyczność technologiczna. Procesy te często stosowane są do wytwarzania odkuwek bimetalicznych (warstwowych) - rys. 1.9a.



- Rys. 1.7. Schemat prasowania w zamkniętej matrycy [8]: 1-stempel, 2-rdzeń, 3-obudowa matrycy, 4-matryca, 5-wypychacz, 6-odkuwka.
- Fig. 1.7. Schematic sketch of closed die pressing [8]: 1-punch, 2-core, 3-die casing, 4-die, 5-pusher, 6-forging.



Rys. 1.8. Sposób kształtowania koła zębatego stożkowego [48]: 1-trzpień, 2-stempel górny, 3-matryca górna, 4-półwyrób spiekany, 5-matryca dolna, 6-wyrzutnik.

Fig. 1.8. A technique of a bevel gear wheel forming [48]: 1-mandrel, 2-upper punch, 3-upper die, 4-sintered semifinal, 5-lower die, 6-shedder.



Rys. 1.9. Schemat procesu wyciskania spiekanych przedkuwek: a) wyciskanie odkuwek warstwowych [48], b) wyciskanie odkuwek z proszku Fe [122].

Fig. 1.9. Scheme of sintered preform extrusion process: a) extrusion of lamellar forgings [48], b) extrusion of Fe-powder forgings [122].

Kształtowanie z zastosowaniem wahającej matrycy (rotacyjne) znalazło zastosowanie głównie do kształtowania odkuwek na zimno. Specyficzna kinematyka procesu zagęszczania [3; 4; 45; 98-100] pozwala na dokładne wypełnienie wykroju przy znacznie mniejszych naciskach prasy w porównaniu z kształtowaniem na prasach mechanicznych. Ten sposób kształtowania [98-100] (rys. 1.10) znalazł zastosowanie głównie do detali o rozwiniętej powierzchni bocznej (koła zębate, tarcze uzębione itp.). Badania prowadzone przez J. Ogrodnika [40], E. Leheupa [45], J. Barana i J. Pręgowskiego [3; 4; 98-100] wyjaśniły kinematykę odkształcenia materiałów porowatych w procesie kształtowania obwiedniowego. Ze względu jednak na niewysoką jeszcze wydajność pras proces ten nie znalazł szerszego zastosowania przemysłowego. Ostatnie rozwiązania konstrukcyjne pras obwiedniowych [39] rokują nadzieje na szersze wdrożenie tej metody dzięki wyposażeniu pras w zespoły znacznie podwyższające wydajność (15 szt./min przy naciskach od 2000-6300 kN).

Kształtowanie odkuwek w matrycach otwartych (rys. 1.11) zastosowane do odkuwek ze spieków charakteryzuje się niższymi naciskami kształtowania oraz mniejszym zużyciem materiału w porównaniu z kuciem materiałów konwencjonalnych. Zwykle odkuwka wykonana jest jednym uderzeniem bijaka. Proces ten cechuje znacznie wyższa trwałość narzędzi. Masa przedkuwek (ze względu na wypływkę) nie musi cechować się wąskim zakresem tolerancji wykonania, co stwarza możliwości unitikacji wsadów spiekanych.



Rys. 1.10. Kształtowanie rotacyjne spiekanych przedkuwek [98]. Rys. 1.11. Kształtowanie w matrycach otwartych [5].

Fig. 1.10. Rotation forming of sintered preforms [98].

Fig. 1.11. Open die forming [5].

## 1.3. Wpływ parametrów procesu technologicznego na własności odkuwek

Zastosowanie przedkuwek spiekanych jako wsadów w procesach kształtowania objętościowego na zimno (lub na gorąco) znacznie rozszerzyło zakres stosowania wyrobów z proszków metali, głównie dzięki poprawie ich własności użytkowych. Wyroby te stosowane są najczęściej jako koła zębate o różnej geometrii uzębienia, korbowody, tarcze, elementy elektronarzędzi itp.

Podstawowym parametrem (obok składu chemicznego) decydującym o własnościach odkuwek ze spieków jest ich gęstość, która powinna zawierać się w granicach 97-99% gęstości teoretycznej. Dla tych wartości porowatość szczątkowa 1-3% odpowiada poziomowi wad (wtrącenia, pęknięcia itp.) występujących w odkuwkach ze stali konwencjonalnych [75]. Odkuwki ze spieków cechują się lepszą izotropowością własności w porównaniu z odkuwkami ze stali konwencjonalnej. Własności te jednak nie są nigdy wyższe od własności materiałów konwencjonalnych o tym samym składzie chemicznym i silnie zależą od porowatości [11; 13] (rys. 1.12).



Rys. 1.12. Wpływ porowatości na własności wytrzymałościowe odkuwek ze spieków [11].

Fig. 1.12. The effect of porosity on the strength of forged sinters [11].



Rys. 1.13. Zmiana udarności odkuwek w zależności od porowatości wewnętrznej (a) oraz ilości wtrąceń (b) dla dwóch wielkości nieciągłości (20μm i 100μm) [11].

Fig. 1.13. Impact strength of forgings with different internal porosity (a) and amount of inclusions (b) for two sizes of the defects (20µm i 100µm) [11].

Na rys. 1.13 przedstawiono zależność udarności od ilości i wielkości wtrąceń dla odkuwki ze stali konwencjonalnej (b) zawierającej 0,25% C; 0,27% Mn; 0,187% Ni; 0,49% Mo oraz zależność udarności od porowatości dla odkuwki ze spieków (a) o tym samym składzie chemicznym.

W tablicach 1.1, 1.2, i 1.3 zestawiono własności stali stopowych wykonanych metodą kucia spiekanych przedkuwek [11; 13]. Przytoczone w tablicach wyniki świadczą o możliwościach wytwarzania odkuwek ze spieków o własnościach zbliżonych do materiałów konwencjonalnych o podobnym składzie chemicznym. Według literatury [11; 46; 97; 98] porowatość, jak również jej rozkład w przedkuwce, są parametrem mającym zasadniczy wpływ na własności końcowe odkuwek, dlatego istotnego znaczenia nabiera przy projektowaniu kucia materiałów porowatych problem optymalnego doboru kształtu przedkuwki i sposobu kształtowania.

Tablica 1.1

Własności mechaniczne stali kutej ze spieków w zależności od sposobu otrzymywania proszku

Materiał	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]	Twardość	Uwagi
Proszek żelaza (PŻ)	309	20	35	84	rozpylany powietrzem
PŻ + 0,4% C	524	11	19	168	rozpylany powietrzem
PŻ	371	43	70	94	proszek elektrolityczny
PŻ + 0,4% C	541	31	52	170	proszek elektrolityczny
PŻ	388	40	70	100	rozpylany wodą
PŻ + 0,4% C	630	20	35	220	rozpylany wodą

## 1.3.1. Wpływ geometrii spiekanej przedkuwki na wlasności odkuwek

Podstawowym problemem przy projektowaniu procesu technologicznego wykonania odkuwek ze spieków jest ustalenie kształtu, wymiarów i gęstości przedkuwki. Jako kryterium prawidłowego doboru wsadu należy przyjąć warunek wykonania odkuwek bez

## Tablica 1.2

Własności wytrzymałościowe odkuwek ze spieków dla różnych wariantów technologicznych obróbki cieplnej

Gatunek stali	Spos	ób obróbki	Porowatość szczątkowa [%]	R. [MPa]	R <sub>m</sub> {MPa}	A [%]	U [J/cm²]
-	stal kuta	ze spieku	1÷2	1030÷1080	2400÷2800	7,8÷9,0	
40H	material konwencjonalny, hartowanie, niskie odpuszczanie			1280÷1380	2500÷3000	3,5÷4,0	36÷45
	stal kuta	ze spieku	1÷1,5	1000÷1050	2270÷2620	10÷11,5	
65G	material konwencjonalny, hartowanie, niskie odpuszczanie			1220÷1310	2100÷2390	6,0÷7,0	47÷58
11023-110	stal kuta ze spieku		1÷4	570÷580		0,5÷9,2	9÷12
HZ3N18	material konwencjonalny			630÷650		24÷26	22÷32
Sklad chem.: C 0.28% Si 0,6% Mn 0,4% Cr 11,5% Co 8.5%	stal kuta z	kierunek wzdlużny		1980			35÷45
	wsadu konw. k	kierunek poprzeczny	-	1900			35÷45
W 7,5% V 0,55% (wagowo)	stal kuta	ze spieków	1÷2	1940÷1960	-		35÷45



Rys. 1.14. Zależność kształtu przedkuwki od stosowanego wariantu kształtowania: a) prasowanie ze stałą szerokością, b) kształtowanie w zamkniętej matrycy, c) kształtowanie w matrycy otwartej.

Fig. 1.14. Effect of the applied forming technique upon the shape of a forging: a) constant width pressing, b) closed die forming, c) open die forming.

#### Tablica 1.3

Porównanie własności wytrzymałościowych odkuwek ze spieków z własnościami odkuwek ze stali konwencjonalnych

Material	Rodzaj obróbki cieplnej	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]	Twardość [HV]	Zawartość węgla [%]
EN16	H850OQT550	865	5	5	325	0,34
EN18	H860OQT300	726	6	7	280	0,27
EN202	H920OQT180	525	30	40	165	0,20
AISI8620	H860OQT600	541	15	20	170	0,22
AISI8635	H840OQT600	659	10	15	182	0,35
EN8	N840AC	602	17	17 -	179	0,50
AISI4635	N850AC	587	21	32	175	0,34
AISI4635	N860OQT400	1081	13	24	359	0,34
AISI4635	H860OQT600	680	20	29	270	0,34
AISI4635	A8500Q	1266	4	3	520	0,34
AISI4625	H900OQ	602	23	32	191	0,24
AISI4615	H900OQ	510	36	39	189	0,15
N - nor H - har A - har	malizowanie towanie towanie izotermiczr	10	AC T OQ	<ul> <li>chłod</li> <li>odpu</li> <li>chłod</li> </ul>	lzenie w pow szczanie lzenie w oleji	ietrzu 1

pęknięć, rozwarstwień, dokładnie odwzorowujących kształt wykroju i pozwalających na uzyskanie wysokiej i równomiernie rozłożonej w objętości odkuwki gęstości. Kształt przedkuwki zależy w dużej mierze od stosowanego procesu technologicznego (rys. 1.14). W literaturze [8; 14; 45] można spotkać różne poglądy odnośnie do zasad ustalania kształtu przedkuwki w stosunku do kształtu gotowego wyrobu. J. Burany [11] podał, że im kształt spieku jest bardziej zbliżony do kształtu gotowej odkuwki, tym większa gwarancja otrzymania odkuwki bez pęknięć i innych wad materiałowych. Z kolei w pracy [80] przedstawiono wyniki badań wskazujące na decydujący wpływ odkształcenia plastycznego na końcową gęstość wyrobu. Tak krańcowe stanowiska świadczą o znacznej rozbieżności poglądów dotyczących zależności geometrycznych przedkuwka --> odkuwka. Spiekana przedkuwka cechuje się pewną ilością wad. Należą do nich między innymi:

- porowatość wewnętrzna,
- warstwy tlenkowe w warstwie przypowierzchniowej,
- zanieczyszczenia i segregacja dodatków wprowadzanych do mieszanki podstawowej.

Wady te obniżają podatność materiału do procesu kształtowania plastycznego, będąc zarodkami pęknięć poprzedzających zniszczenie materiału. W kształtowanej przedkuwce musi więc istnieć taki stan naprężeń, który umożliwiając płynięcie plastyczne osnowy nie spowoduje lokalnie powstania naprężeń rozciągających. Naprężenia te są przyczyną utraty spójności w mikroobszarach kształtowanej odkuwki lub lokalnego wzrostu porowatości w wyniku powiększania wymiarów nieciągłości. Wcześniejsze wyniki prac autora niniejszej rozprawy [25; 51; 60] wskazują na to, że w obszarach poddanych dużym odkształceniom plastycznym porowatość jest minimalna i równomiernie rozłożona w objętości odkuwki. Wynika stąd, że tylko procesy, które umożliwiają kształtowanie odkuwki z udziałem odkształceń plastycznych w jej objętości, pozwałają na otrzymanie odkuwek o wysokich własnościach finalnych

## 1.3.2. Klasyfikacja odkuwek ze spieków

Własności finalne odkuwek ze spieków zależą w dużej mierze od przyjętego sposobu ich kształtowania. Sposób kształtowania wymusza z kolei geometrię zastosowanej w procesie przedkuwki. W pracach [11; 22; 80] podkreślono również wpływ sposobu kształtowania między innymi na zużycie energii i trwałość narzędzi. W pracy [17] zaproponowano klasyfikację odkuwek ze spieków z uwzględnieniem sposobu kształtowania i geometrii przedkuwki (tabl. 1.4). Podział ten jednak ograniczono do odkuwek osiowo-symetrycznych. Wynika to z faktu, że kształtowanie odkuwek ze spieków stosuje się przede wszystkim do kucia tego typu odkuwek, a tylko sporadycznie do kucia odkuwek o osi wydłużonej.

W pracach [106; 110] omówiono procesy, w których dominuje kształtowanie odkuwek przez zagęszczanie (redukcja wysokości przedkuwki do wysokości odkuwki, kucie ze stałą szerokością). Proces ten, aczkolwiek prowadzi do wzrostu gęstości, to jednak, ze względu na brak odkształceń postaciowych oraz duże tarcie o ścianki matrycy, nie pozwala na zmniejszenie porowatości poniżej 10%.

Klasyfikacja odkuwek ze spieków

Grups		Charakterystyka odkuw	ek	Charakterystyka prz	edkuwek
klasyfik.	Pod- grupa	Proporcje wymiarowe	Kształt odkuwki	Stopień zbliżenia kształtu do gotowej odkuwki	Ksztalt przedkuwki
1	2	3	4	5	б
	ì	Odkuwki osiowo-symetryczne $0.6 < \frac{h_k}{d} < 1$	@ <sup>@</sup>	Przekrój poprzeczny odkuwki równy przekrojowi przedkuwki	@ @
I	2	Odkuwki osiowo symetryczne $1 \le \frac{h_k}{d} \le 2$	0	Jak w grupie I-1	
	3	Odkuwki z występami na powierzchniach czołowych	6 3	Przekrój poprzeczny odkuwki równy przekrojowi odkuwki	0
L1	1	Odkuwki o stosunku $\frac{h_k}{d} > 2$	0 0	Jak w grupie I-1	

Tablica 1.4. c.d.

1	2	3	4	5	6
	- 1	Odkuwki z występami	8 8 1	Kształt poprzeczny odkuwki odpowiada przedkuwce	
v	2	Odkuwki typu podkładek kół zębatych	۵	J. w.	• 6
	3	Odkuwki z występami	r.C.	J. w.	r and a start of the start of t

Tablica 1.4. c.d.

1	2	3	4	5	6
ш	1	Odkuwki o stopniowanej średnicy z otworami w osi odkuwki	0	Jak w grupie I-1	
	1	Koło zębate stożkowe	años.	Cylindry z zaokrągleniem $d_{ODK} > d_{sp}$	
IV	2	Odkuwki o tworzącej krzywoliniowej	00	Cylindry $d_{ak} > d_{rp}$	
	3	Kola zębate	637	J. w.	

## 1.3.3. Porównanie procesów kształtowania na zimno i na gorąco odkuwek ze spieków

Według literatury [15; 106; 110] procesy kształtowania spieków na zimno znajdą szersze zastosowanie w praktyce przemysłowej w porównaniu z procesami kucia na gorąco. Czymikiem determinującym szybkie tempo rozwoju tej metody jest możliwość znacznego zbliżenia kształtu odkuwki do kształtu gotowego elementu, zmniejszenia zużycia materiałów, zwiększenia dokładności i powtarzalności odkuwek. Procesy te pozwalają również na kształtowanie odkuwek "bezporowatych" umocnionych procesami odkształcenia plastycznego na zimno. Nie bez znaczenia jest również fakt, że wdrożenie omawianych technologii nie wymaga instalacji urządzeń do bezzgorzelinowego nagrzewania wsadu. Mniejsza podatność do kształtowania plastycznego na zimno materiałów spiekanych może być rekompensowana właściwym doborem schematu stanu naprężeń (nie powodującym powstania naprężeń rozciągających i utraty spójności, szczególnie w kierunkach prostopadlych do kierunku działania nacisku). Kształtowanie plastyczne na zimno cechuje również wyższa stabilność parametrów procesu w porównaniu z procesem kształtowania na gorąco. W procesach kształtowania plastycznego na zimno w połączeniu z zabiegami obróbki cieplno-chemicznej istnieje możliwość wytwarzania elementów przeznaczonych na wysoko-obciążone części maszyn. Warunkiem ekonomiczności procesu jest jednak maksymalne zbliżenie kształtu odkuwki do kształtu gotowego wyrobu, co prowadzi do oszczędności materiałowych i obniżenia pracochłonności obróbki skrawaniem. Jakość odkuwek kształtowanych na zimno zależy w dużej mierze od stanu naprężeń w procesie kształtowania. Nieobojetny jest również udział tzw. spajania odkształceniowego nieciągłości wewnetrznych [22; 51; 69]. W pracy [23] przeprowadzono badania, które wykazały, że gestość odkuwek ksztaltowanych na zimno jest równa gęstości odkuwek ksztaltowanych na gorąco. Tak więc, procesy kształtowania na zimno powinny znaleźć zastosowanie w przypadku, gdy wymagane własności eksploatacyjne są wyższe od możliwych do uzyskania w konwencjonalnych procesach metalurgii proszków. Przy projektowaniu procesu trzeba jednak mieć na uwadze nieco niższą odkształcalność graniczną spieków w porównaniu z materiałami litymi.

# 1.4. Matematyczne modelowanie procesów płynięcia plastycznego spieków

## 1.4.1. Warunki plastyczności materiałów porowatych

Teoria płynięcia materiałów porowatych, opierając się na założeniach klasycznej teorii plastyczności, powinna dodatkowo uwzględniać specyficzną podatność do kształtowania materiałów porowatych. Podstawowym problemem jest adaptacja równań opisujących warunki płynięcia materiałów litych do opisu ośrodka porowatego.

Zasadniczą cechą odróżniającą materiał porowaty od materiałów nieściśliwych jest to, że podczas odkształcenia obok zmian postaci występują również zmiany objętości. Fakt ten świadczy o możliwości przejścia materiału w stan plastyczny przy dowolnym schemacie stanu naprężeń nawet w warunkach stanu hydrostatycznego. Wobec powyższego powierzchnia  $f(\sigma_{ij}) = 0$  istniejąca w przestrzeni naprężeń jest powierzchnią zamkniętą (tabl. 1.5). Utrudnia to znacznie analizę teoretyczną procesu, bowiem klasyczne równania bazujące na modelu nieściśliwego ciała sztywno-plastycznego tracą swój sens fizykalny.

Materiał porowaty powstały w wyniku prasowania i spiekania proszków metalicznych złożony jest z metalicznej osnowy o określonych parametrach (dających się opisać za pomocą równań klasycznej teorii plastyczności) oraz zróżnicowanych geometrycznie nieciągłości rozmieszczonych chaotycznie w objętości (rys. 1.15).



$$V_N = \sum_{i=1}^n V_{ni}$$
$$V_N < V_O < V_S$$
$$V_S = V_N + V_O$$

W wyniku odkształceń plastycznych osnowy  $V_S \rightarrow V_o$  oraz  $V_N \rightarrow 0$ .

Rys. 1.15. Model ośrodka porowatego uwzględniający warunki ciągłości. Fig. 1.15. A model of porous medium incorporating conditions of contiguity.

Poprawność uzyskanych rozwiązań uwarunkowana jest przyjęciem następujących zalożeń wstępnych:

- spiek złożony jest z osnowy oraz losowo rozłożonych w niej zróżnicowanych co do kształtu i wielkości nieciągłości,
- wskaźniki charakteryzujące cechy geometryczne oraz rozmieszczenie nieciągłości w osnowie spełniają prawa statystyki matematycznej,
- zmiana objętości ośrodka zachodzi tylko w wyniku redukcji lub wzrostu nieciągłości wewnętrznych,

- material osnowy jest nieściśliwy, izotropowy i spełnia warunek plastyczności np. Hubera-Missesa i prawa plastycznego płynięcia Levi-Missesa,
- materiał osnowy nie wykazuje efektu Bauschingera,
- własności ośrodka są reprezentowane przez własności osnowy.

Dla przedstawionej na rys. 1.15 objętości przyjęto model kontynualny traktując ją jako ściśliwy ośrodek ciągły, w którym obowiązuje prawo zachowania masy.

$$\rho_0 V_0 = \rho_1 V_1 \dots \rho_i V_i \dots \rightarrow \rho_l V_l \tag{1.1}$$

czyli:

$$\frac{x y z}{x_0 y_0 z_0} = \frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho}$$
(1.2)

po przekształceniu i zlogarytmowaniu:

$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = \ln \frac{V}{V_0} = -\ln \frac{\rho}{\rho_0}$$
 (1.3)

Różniczkując zależność (1.3) po czasie otrzymano:

$$\frac{1}{x}\frac{dx}{dt} + \frac{1}{y}\frac{dy}{dt} + \frac{1}{z}\frac{dz}{dt} = \frac{1}{V}\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$$
(1.4)

Lewa strona wyrażenia (1.4) przedstawia pierwszy niezmiennik tensora prędkości odkształceń:  $e_x + e_y + e_z = e_{RR}$ , podstawiając i wprowadzając w miejsce gęstości porowatość według zależności  $\rho = (1 - \Theta)$  otrzymano:

$$e_{KK} = \frac{1}{1 - \Theta} \frac{d\Theta}{dt} \tag{1.5}$$

Składowe tensora prędkości odkształceń wyrażone przez składowe wektora prędkości płynięcia zapisano jako:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad stad \quad e_{KK} = v_{i,i}$$
 (1.6)

w efekcie można więc przyjąć, że porowatość ośrodka jest funkcją położenia i kształtu co można wyrazić w postaci:

$$v_{i,i} = \frac{1}{1 - \Theta} \left( \Theta_{\gamma} + v_i \Theta_{\gamma_i} \right) \tag{1.7}$$

Równanie ciągłości ośrodka (1.7) wyrażające prawo zachowania masy zastępuje warunek nieściśliwości  $v_{i,i} = 0$  stosowany w klasycznej teorii plastyczności [81].

Analizując rozkład naprężeń i odkształceń podczas odkształcenia plastycznego konieczne jest określenie równań równowagi i warunku plastyczności materiału porowatego. Opis matematyczny warunku plastyczności materiałów porowatych był przedmiotem wielu publikacji. W pracach [12; 23; 32; 38; 44; 78; 83; 84; 88; 93; 101; 111; 113; 124] przedstawiono wzory opisujące warunek plastyczności ośrodka porowatego. Matematyczne opisy warunku plastyczności opracowane przez różnych autorów i reprezentujące główne kierunki badawcze tej problematyki zestawiono w tablicach 1.5 i 1.6.

Warunek plastyczności materiałów konwencjonalnych określa się najczęściej według hipotezy Hubera-Missesa opisującej przejście materiału w stan plastyczny w momencie, gdy wartość  $\sigma_i$  jest równa naprężeniu uplastyczniającemu. W przypadku materiałów porowatych przejście w stan plastyczny zależy również od jego porowatości (gęstości). Tak więc warunek plastyczności materiałów porowatych powinien uwzględniać funkcyjną zależność pomiędzy składowymi stanu naprężenia, naprężeniem uplastyczniającym materiału osnowy oraz porowatością.

W większości prac z tej dziedziny przyjęto założenie, że przejście materiału porowatego w stan plastyczny uzależnione jest od wartości  $\sigma_i$ , to jest wartości naprężenia uplastyczniającego dla jednoosiowego stanu naprężeń. Wartości  $\sigma_i$  można określić z energii swobodnej F spieku wyrażonej poprzez składowe tensora naprężeń:

$$F = \int_{V} \left[ G \left( \mathbf{U}_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \right)^2 + \frac{K}{2} \mathbf{U}_{il}^2 \right] dV$$
(1.8)

Tensor odkształceń wyrażono poprzez tensor naprężeń za pomocą zależności:

$$U_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} U_{il} = \frac{1}{2G} (\sigma_{ik} - \delta_{ik} p)$$
(1.9)

$$\mathbf{U}_{ij} = -\frac{p}{K} \tag{1.10}$$

Podstawiając (1.8) i (1.9) do (1.10) otrzymano:

$$F = \left[\frac{1}{2G}(\sigma_{ik} - \delta_{ik}p) + \frac{1}{2K}p^2\right]V_s$$
(1.11)

Materiał porowaty złożony jest z fazy ciągłej (materiał osnowy) oraz nieciągłości wewnętrznych. Swobodna energia sprężysta nieciągłości jest równa zeru, stąd też energia swobodna układu F jest równa energii osnowy. Energia ta jest określona zależnością:

$$F = (F_{OB} + F_{\phi})V_s \tag{1.12}$$

$$F_{OB} = \frac{p^2}{2K_0}$$
 (1.13)

$$F_{\bullet} = \frac{1}{12G} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = \frac{1}{6} \frac{\sigma_1^2}{G}$$
(1.14)

Autor	Równanie plastyczności	Powierzchnia plasytczności	Uwagi
1	2	3	4
G. Kuhn C. Downey [44]	$\sigma_{pl} = [3J_2 - (1 - 2v)J_1]^{\frac{1}{2}}$		$\nu = 0.5 \vartheta^a$ $a = 1.92 + 2$
R. I. Green [76]	$\delta \sigma_{pl}^{2} = 3J_{2} + \alpha J_{1}^{2}$ $\alpha = \frac{1}{4} \left[ \frac{3(1 - \Theta^{\frac{1}{3}})}{(3 - 2\Theta^{\frac{1}{4}}) \ln \Theta} \right]^{2}$ $\delta = \left[ \frac{3(1 - \Theta^{\frac{1}{3}})}{3 - 2\Theta^{\frac{1}{4}}} \right]^{2}$	G3 6m	
V. V. Skorohod L. L. Tučinskij [120]	$\sigma_{pl}^{2} = \frac{3}{2} \frac{1}{(1-\Theta)^{3}} \left[ (\sigma_{1} - \sigma_{m})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{m})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{m})^{2} + \frac{3}{2} \sigma_{m}^{2} \frac{\Theta}{(1-\Theta)} \right]$	18.	

Warunki plastyczności materiałów porowatych podawane przez różnych autorów



Tablica 1.5. c.d.
Warunek plastyczności	Równanie warunku plastyczności	Współczynniki uogólnione warunku plastyczności	$\sigma_{pl}^{*} = \sigma_{p}^{l} f(\vartheta)$	Liczba Poissona
1	2	3	4	5
Beltrami	$3AJ_2 + BJ_1^2 = \sigma_{pl}^2$ $3(1 - \alpha)J_2 + \alpha J_1^2 = \sigma_{pl}^2$	$A = \frac{2}{3}(1 - \nu)$ $B = \frac{1}{3}(1 - 2\nu)$ $\alpha = \frac{1}{3}(1 - 2\nu)$ Dla $\vartheta = 1, A = 1, B = 0$	0'm	
G. Kuhn C. Downey [44]	$\sigma_{pi}^{s} = [3J_2 - (1 - 2\nu)I_2]^{\frac{1}{2}}$	$A = \frac{2}{3}(1 + \frac{1}{2}v^{1.92})$ $B = \frac{1}{3}(1 - v^{1.92})$ $\alpha = \frac{1}{3}(1 - v^{1.92})$ $I_2 = \frac{1}{3}J_1^2$ $\sigma_{pl} - \text{określone doświadczalnie dla danego p}$	d'a	$\nu = \frac{1}{2}\vartheta^{1.92}$

Warunki plastyczności materiałów porowatych uogólnione do równania Beltrami'ego

Tablica 1.6. c.d.

1	2	3	4	5
R. G. Green [23]	$3J_{2} + \alpha_{1}J_{1}^{2} = \delta \sigma_{\rho}^{02}$ $\alpha_{1} = \frac{1}{4} \left[ \frac{3(1 - \Theta^{\frac{1}{3}})}{(3 - 2\Theta^{\frac{1}{4}}) \ln \Theta} \right]^{2}$ $\delta = \left[ \frac{3(1 - \Theta^{\frac{1}{3}})}{3 - 2\Theta^{\frac{1}{4}}} \right]^{2}$	$A = \frac{1}{1 + \alpha_1}$ $B = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1}$ $\alpha = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1}$ $\Theta = 1 - \vartheta$	$\sigma_{pl}^{z} = \left(\frac{\delta}{1-\alpha_{1}}\right)^{\frac{1}{2}} \sigma_{p}^{0}$	$v = \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha_1)}$
V. V. Skorohod L. I. Tučinskij [120]	$\sigma_{\mu l}^{\mu 2} = \frac{3}{2} \frac{1}{(1-\Theta)^3} \left[ (\sigma_1 - \sigma_{\mu})^2 + (\sigma_2 - \sigma_{\mu})^2 + (\sigma_3 - \sigma_{\mu})^2 + \frac{3}{2} \sigma_{\mu}^2 \frac{\Theta}{1-\Theta} \right]$	$A = \frac{40}{30+1}$ $B = \frac{1-0}{30+1}$ $a = \frac{1-0}{30+1}$ $\Theta = 1-0$	$\sigma_{pl}^{*} = \sigma_{pl}^{l} \frac{2\vartheta^{2}}{\left(3\vartheta + \mathbf{J}_{1}\right)^{\frac{1}{2}}}$	$v = \frac{30 - 1}{30 + 1}$

Tablica 1.6. c.d.



Przekształcając (1.11) i (1.12) z uwzględnieniem (1.13) i (1.14) oraz wprowadzając pojęcia tzw. objętości rzeczywistej oraz nacisku rzeczywistego w materiałach porowatych jako  $V_l = V_s (1 - \Theta)$ ,  $p_l = p_s (1 - \Theta)$  otrzymano zależność:

$$\frac{1}{4G}\left[(\sigma_1 - p)^2 + (\sigma_2 - p)^2 + (\sigma_3 - p)^2\right] + \frac{p^2}{4K} = \left(\frac{p_0^2}{2K} + \frac{1}{6}\frac{\sigma_i^2}{G}\right)(1 - \Theta)$$
(1.15)

i po przekształceniu:

$$\frac{3}{2} \frac{1}{(1-\Theta)^3} \left[ (\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2 + \frac{3}{2} \sigma_m^2 \frac{1}{(1-\Theta)} \right] = \sigma_{pl} \quad (1.16)$$

Tak sformułowany warunek plastyczności uwzględnia porowatość materiału i pozwala na opis płynięcia plastycznego materiału porowatego, nie uwzględnia on jednak bardzo istotnego wpływu umocnienia osnowy.

W pracy [111] sformułowano warunek plastyczności uwzględniający wpływ umocnienia osnowy. Zależność pomiędzy naprężeniami i prędkością odkształcenia przyjęto w postaci:

$$\sigma_{ij} = 2\eta \left( \dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \,\delta_{ij} \right) + \dot{\lambda} e \,\delta_{ij} \tag{1.17}$$

Energia dysypowana rozpatrywanego elementu wyraża się zależnością:

$$\Psi_{0} = \eta \left( \dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \, \delta_{ij} \right) \left( \dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \, \delta_{ij} \right) + \frac{1}{2} \, \lambda \, e^{2} \tag{1.18}$$

W materiałąch porowatych energia dysypowana zależy również od gęstości, co wyrażono jako:

$$\Psi = (1 - \Theta) \Psi_0 \tag{1.19}$$

Podstawiając (1.18) do (1.19) z uwzględnieniem (1.17) i podstawieniem  $\tau = (\sigma_{ii} - \rho \,\delta_{ij}); \ \eta = \eta_0 \varphi(\Theta); \ \lambda = \eta_0 \chi(\Theta) \text{ otrzymano:}$ 

$$\frac{1}{4\eta}\tau^{2} + \frac{1}{2\lambda}p^{2} = \dot{\lambda}_{0}\tau_{0}^{2}(1-\Theta)$$
(1.20)

oraz ostatecznie po przekształceniu:

$$\frac{\tau^2}{f^2(\Theta)} + \frac{p^2}{g^2(\Theta)} = \tau_0^2(1 - \Theta)$$
(1.21)

Równanie (1.21) przedstawia powierzchnię plastyczności uwzględniającą umocnienie materiału. Takie ujęcie warunku plastyczności może znaleźć szerokie zastosowanie do analizy płynięcia plastycznego przy odkształceniu na zimno materiałów spiekanych, jednak zastosowanie go wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia funkcji pomocniczych. Inne podejście zaprezentowano w pracach przedstawionych przez Y. Corapcioglu, M. W. Siegała i innych [12; 38; 101; 113]. Materiał porowaty modelowano tutaj jako sztywno-plastyczną, izotropową osnowę z rozmieszczonymi w niej nieciągłościami. Materiał ten przechodzi w stan plastyczny po przekroczeniu naprężeń spełniających warunek plastyczności materiałów porowatych. Równanie powierzchni plastyczności dla tego materiału można wyrazić jako:

$$F \equiv f(\sigma_{ip}\Theta_{j}) = 0 \tag{1.22}$$

Najczęściej równanie (1.22) przedstawiane jest w postaci:

$$f = \sigma_i^2 + 9\alpha \sigma_{ac}^2 - \beta \sigma_{pl}^2 = 0$$
  
lub  
$$f = \gamma(\Theta)T^2 + 9\alpha(\Theta)\sigma^2 - \sigma_{pl}^2 = 0$$
(1.23)

Funkcjonał mocy przyjmowany jest w postaci [112]:

$$J = \int_{V} \sigma_{pl} \left( \frac{H^2}{\gamma} - \frac{\lambda^2}{9\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} dV - \int_{S} p_i (1 - \Theta_i) ds \qquad (1.24)$$

W równaniu (1.24) założono, że wartości  $\sigma_{pl}$  i  $\Theta$  oraz funkcje  $\gamma(\Theta)$ ;  $\alpha(\Theta)$  są znane i opisane dla każdego punktu objętości V. Pozwala to rozwiązać równanie (1.24) metodami numerycznymi np. metodą elementów skończonych. Dla  $\Theta = 0$  i  $\alpha(\Theta) = 0$  $\gamma(\Theta) = 3$ ,  $\vartheta = \vartheta_L$  równanie (1.24) pokrywa się z rozwiązaniami klasycznej teorii materiałów sprężysto-plastycznych.

Nieco odrębne podejście zaprezentowali autorzy pracy [78] przyjmując tzw. progowy charakter odkształcenia plastycznego materiałów porowatych. Materiał w tym modelu charakteryzowany jest temperaturą procesu T, porowatością  $\Theta$  i podatnością do umacniania n. W modelu tym możliwe jest również uwzględnienie początkowej nierównomierności rozmieszczenia nieciągłości wewnętrznych.

Interesujący przykład zastosowania klasycznej teorii plastyczności przedstawiono również w pracy [35], gdzie ośrodek porowaty scharakteryzowano stałymi sprężystości, których wartość zależy od jego gęstości. Model ten wykorzystano do analizy płynięcia spieku w prostych operacjach kucia na zimno oraz kucia na gorąco.

Przytoczone powyżej równania nie wyczerpują wszystkich rozwiązań cytowanych w literaturze. W przedstawionym powyżej omówieniu pominięto te opisy, które wywodząc się z mechaniki gruntów (rozwiązania cytowane przez T. Tabata, J. Abe, W. Pragera i V. E. Perelmana [49; 50]), ze względu na znaczne uproszczenia przyjętego sposobu rozwiązania, nie zapewniają niezbędnej dokładności uzyskanych rozwiązań. Rozwiązania te znacznie różnią się od wyników eksperymentu, szczególnie dla dużych odkształceń plastycznych ośrodka porowatego.

Poprawne rozwiązanie zagadnień kształtowania materiałów porowatych wymaga również uwzględnienia w opisie warunku plastyczności wpływu porowatości, umacniania się materiału oraz probabilistycznego charakteru własności materiału. Umocnienie osnowy (a tym samym wartość naprężenia uplastyczniającego) zależy od wielkości odkształcenia plastycznego oraz od porowatości, co w rezultacie sprawia dużo trudności przy próbach uogólnienia. W publikacjach [32; 78] przedstawiono sposób matematycznego ujęcia wpływu gęstości na naprężenie uplastyczniające. W pracy [78] opierając się na wynikach badań eksperymentalnych wyprowadzono zależności opisujące wpływ gęstości na zmianę podstawowych cech materiałowych.

$$E_{s} = \mathfrak{d}^{m} E$$

$$\sigma_{pls} = \mathfrak{d}^{m} \sigma_{pl} \qquad (1.25)$$

$$A_{rs} = \mathfrak{d}^{m} A_{r}$$

Przyjęcie w równaniach (1.25) wpływu gęstości w postaci wykładniczej znacznie ogranicza zakres ich stosowania ze względu na brak sensu fizykalnego w warunkach brzegowych.

# 1.4.2. Metody matematycznego rozwiązywania zagadnień plastycznego płynięcia

Do metod matematycznych, które są stosowane do rozwiązywania zagadnień płynięcia plastycznego materiałów porowatych, podobnie jak w konwencjonalnej teorii procesów przeróbki plastycznej, należą: metoda górnej oceny, metoda charakterystyk oraz metoda elementów skończonych. Ta ostatnia dzięki dynamicznemu rozwojowi mikrokomputerów stała się bardzo efektywnym narzędziem numerycznego rozwiązywania wielu zagadnień symulacyjnych [33; 82-95; 102; 105]. W kraju została ona przez M. Głowackiego, J. Kusiaka, M. Pietrzyka i innych [94; 95; 107; 108; 125] zastosowana do analizy płynięcia materiałów litych podczas walcowania, ciągnienia oraz kucia.

Opracowany przez C. H. Lee i S. Kobayashi'ego oraz adaptowany przez M. Oyane, S. Shimę i T. Kawakami'ego do osobliwości ośrodka porowatego sztywno-plastyczny model płynięcia pozwolił rozszerzyć zakres jej stosowania do analizy dużych odkształceń plastycznych ośrodków nieciągłych.

W metodzie tej odkształcany element dzieli się hipotetycznie na małe elementy (rys. 1.16), dla których określa się kinematycznie dopuszczalne prędkości lub przemieszczenia, minimalizujące rozproszenie energii wywołane odkształceniem.

G. L. Petrosjan w pracach [88-93] przedstawił podstawowe zależności metody elementów skończonych w zastosowaniu do analizy procesów kształtowania materiałów porowatych. Zależność pomiędzy stanem naprężeń  $\{\sigma\}$ , a tensorem przyrostów odkształceń  $\{d\varphi\}$  można zapisać w postaci:

$$\{\sigma\} = [\mathbf{D}]\{d\varphi\}$$

(1.26)



- Rys. 1.16. Modelowanie próby spęczania metodą elementów skończonych: a) siatka elementów, b) obliczony rozkład gęstości odkuwki.
- Fig. 1.16. Upset forging modelling by finite elements method: a) element network, b) calculated forging density distribution.

gdzie wyrażenie [D] jest macierzą:

$$[\mathbf{D}] = \frac{E(1-C)}{(1+C)(1-2C)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{C}{1-C} & 0 \\ \frac{C}{1-C} & 1 & \frac{C}{1-C} & 0 \\ \frac{C}{1-C} & 1 & \frac{C}{1-C} & 0 \\ \frac{C}{1-C} & \frac{C}{1-C} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1+C)(1-2C)(1+\alpha^{m})}{3(1-C)} \end{bmatrix}$$
(1.27)

w której:

$$E = \frac{\beta^{3n} \sigma_{ebw}}{\overline{d} \varphi_{ebw}}; \qquad C = \frac{\zeta - \alpha^{m}}{1 + \alpha^{m}}$$

$$\alpha = \frac{1}{4} \left[ \frac{3(1 - \vartheta)^{\frac{1}{3}}}{(3 - 2\vartheta^{\frac{1}{4}}) \ln \vartheta} \right]; \qquad \beta = \left[ \frac{3(1 - \vartheta^{\frac{1}{3}})^{\frac{1}{3}}}{3 - 2\vartheta^{\frac{1}{4}}} \right] \qquad (1.28)$$

Zmianę porowatości materiału określono z zależności:

$$d\vartheta = \frac{9\alpha^m (1-\vartheta) d\varphi_{ekw} \sigma_0}{\beta^{3n} \sigma_{ekw}}$$
(1.29)

W zależnościach (1.28) oraz (1.29) zostało wprowadzone za [90 i 91] pojęcie tzw. ekwiwalentnego naprężenia  $\sigma_{ekw}$  oraz ekwiwalentnego przyrostu odkształcenia  $d\varphi_{ekw}$ . Zależność pomiędzy przyrostem sił węzłowych  $\{dP\}$  i wektorem przemieszczeń punktów węzłowych  $\{dq\}$  wyrażono jako:

$$\{dP\} = [K] \{dq\}$$
 (1.30)

Równania te rozwiązywane są względem  $\{dq\}$  z uwzględnieniem warunków brzegowych. Przyrosty odkształceń plastycznych określono z zależności:

$$\{d\varphi\} = [\mathbf{B}]\{dq\} \tag{1.31}$$

Macierz sztywności pojedynczego elementu zapisano jako:

$$[\mathbf{K}] = \sum_{i} [k] = 2\Pi [\mathbf{B}]^{\mathrm{T}} [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] \bar{r} S$$
(1.32)

Zespół zależności (1.26) - (1.32) pozwala na wyznaczenie rozkładu porowatości w procesach kształtowania plastycznego. W pracach [88-93] wyznaczono na tej podstawie stan naprężeń i rozkład porowatości. Obliczenia i weryfikację eksperymentalną prowadzono dla wybranych procesów osiowo-symetrycznych.

# 1.4.3. Przegląd metod oceny nierównomierności odkształceń materiałów porowatych

Weryfikacja eksperymentalna modeli płynięcia, jak również uzyskanych za ich pomocą rozwiązań szczegółowych, wymaga opracowania metod umożliwiających ilościowe porównanie wyników. Metody te powinny umożliwiać kompleksową ocenę wpływu parametrów procesu kształtowania na własności końcowe spieku.

Najważniejszym czynnikiem (oprócz składu chemicznego) decydującym o jakości eksploatacyjnej elementów wytwarzanych metodami metalurgii proszków jest gęstość (porowatość) końcowa i jej rozkład w objętości. Dlatego sposób oceny powinien również w sposób bezpośredni lub pośredni pozwalać na uzyskanie danych o rozkładzie gęstości lub porowatości na analizowanej powierzchni.

Ogólnie omawiane w literaturze metody analizy eksperymentalnej można podzielić na dwie grupy:

- analiza oparta na wynikach badań cech materiałowych np. ocena rozkładu twardości, wielkości ziarna, wielkości nieciągłości,
- analiza oparta na wynikach badań elastooptycznych lub siatek podziałowych.

Metody eksperymentalne pozwalają w sposób bezpośredni lub pośredni na ocenę rozkładu odkształceń na powierzchni przekroju odkuwki ze spieków, ocenę zmian gęstości, a tym samym na analizę kinematyki procesów kształtowania. Do najbardziej rozpowszechnionych metod pierwszej grupy należy analiza rozkładu twardości. Metoda ta wykorzystuje zależność twardości od umocnienia odkształceniowego materiału osnowy, wyniki rozkładu twardości łączone są często z oceną strukturalną [15; 116]. Na podstawie tych wyników wyznaczyć można rozkład porowatości [88; 97], jak również składowe stanu naprężeń i odkształceń [15; 97; 116] (rys. 1.17).



Rys. 1.17. Strefy odkształceń przy spęczaniu (a) i wyciskaniu współbieżnym (b). Fig. 1.17. Deformation zones for upset forging (a) and forward extrusion (b).

W warstwach leżących w pobliżu powierzchni kowadła twardość rośnie od osi próbki w kierunku promieniowym. W strefie środkowej zauważyć można zmianę kierunku wzrostu twardości (twardość rośnie od stref zewnętrznych do osi próbki). Niższe wartości twardości w strefie I są efektem mniejszych odkształceń postaciowych spieku w tym obszarze. Metoda ta umożliwia jakościową ocenę wielkości odkształceń plastycznych w poszczególnych obszarach odkuwki. Stosowanie tej metody oparte jest na analogiach obowiązujących w teorii procesów obróbki plastycznej materiałów konwencjonalnych. Pomiar twardości materiałów spiekanych obarczony jest jednak błędem wynikającym z istnienia nieciągłości w warstwach podpowierzchniowych. Wyniki obserwacji metalograficznych pozwalają jedynie w sposób przybliżony określić rozkład odkształceń w objętości odkuwki. W pracy [10] przedstawiono wynik oceny rozkładu gęstości przy kuciu odkuwek osiowo-symetrycznych. Prezentowana metodyka polegała na przygotowaniu metodą izostatycznego prasowania przedkuwki i kształtowaniu jej w matrycach (rys. 1.18). Przedkuwkę po przecięciu i naniesieniu siatki odkształcono w matrycy, a następnie dokonano pomiarów rozkładu twardości w węzlach siatki pomiarowej. Na podstawie ustalonej eksperymentalnie zależności  $\rho = f(HB)$ 

określano gęstość odkuwki w punktach pomiarowych. Uzyskane wyniki świadczą o zdecydowanym wpływie schematu stanu naprężenia na rozkład gęstości końcowej.



Rys. 1.18. Rozkład gęstości w odkuwce kształtowanej ze stałą szerokością: a) przedkuwka, b) odkuwka, c) matryca.

Fig. 1.18. Distribution of density in a forging formmed in a constant width die: a) preform, b) forging, c) die.

Metody siatek - w badaniach tych stosuje się metody identyczne z przyjętymi w badaniach płynięcia plastycznego materiałów konwencjonalnych. Do najbardziej rozpowszechnionych należą:

- metoda siatek Mory,
- metody siatek podziałowych.

Metoda Mory oparta jest na zjawisku interferencji powstającej przy nałożeniu na siebie dwóch siatek (odkształconej i nieodkształconej). Po odkształceniu i nałożeniu siatki wzorcowej fotografuje się pasma odpowiadające promieniowym V, i osiowym V prędkościom przemieszczenia punktów (rys. 1.19).

Metoda siatek podziałowych wykorzystywana jest również do weryfikacji eksperymentalnej wyników uzyskiwapych dla modeli rozwiązywanych z zastosowaniem metody elementów skończonych. Analiza rozkładu odkształceń (rys. 1.20) ujawniła istnienie dwóch stref utrudnionych odkształceń: bezpośrednio przed stemplem oraz w dolnej części odkuwki. Tłumaczyć to można omówionym wcześniej problemem uzależnienia wzrostu gęstości odkuwki od powstania warunków do odkształceń postaciowych.



- przeciwbieżnym [32].
- Fig. 1.19. Distribution of V. (a) and V, przygotowania (b) components in backward extrusion [32].

Wraz ze zmniejszeniem początkowej spieku maleje intensywność gestości odkształceń. Wynika to z pochłonięcia części energii odkształcenia na zagęszczanie spieku poprzez zamykanie nieciągłości wewnętrznych. Dla gęstości początkowych  $\vartheta \le 0.6$  zdaniem autorów pracy [10] praktycznie zanikają strefy utrudnionych odkształceń.

Omówione wyżej metodyki nie wyczerpują wszystkich prezentowanych w literaturze. Ze względu na postawiony cel omówiono tylko te, które pozwalają na ocenę zmian własności w warunkach dużych Rys. 1.19. Rozkład składowych  $V_z$  (a) odkształceń plastycznych. Cechą ujemną oraz V, (b) przy wyciskaniu omówionych wyżej metod jest bardzo duża pracochlonność zarówno na etapie próbek, jak również pomiarów czy to elementów siatki, czy to twardości. Ma to istotny wpływ zarówno na dokładność wyników, jak również możliwą



Rys. 1.20. Rozkład intensywności prędkości odkształcenia i naprężeń przy wyciskaniu przeciwbieżnym [32].

Fig. 1.20. Distribution of deformation speed intensity and stress in backward extrusion [32].

do wykonania powtarzalność prób w zbiorze wyników. Z tych to powodów ostatnio coraz częściej poszukuje się metod umożliwiających z jednej strony kompleksową weryfikację opracowanego modelu, z drugiej pozwalających na wykonanie niezbędnej ilości powtórzeń. Szczególnie dynamiczny rozwój przeżywają metody ujmujące własności materiału w sposób probabilistyczny.

Do oceny udziału objętościowego, wielkości i kształtu nieciągłości podejmowane są próby wykorzystania stosowanych w metalografii parametrów stereologicznych, a przede wsztstkim techniki cyfrowej do automatycznej analizy obrazu, jak również oceny statystycznej uzyskanych wyników. Umożliwiło to zastosowanie metod ilościowej analizy obrazu do weryfikacji eksperymentalnej opracowanych modeli symulacyjnych. Analiza literatury [16; 18; 29] wykazała, że jest to w chwili obecnej najbardziej efektywna metoda stosowana w analizie czynników strukturalnych materiałów.

# 1.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Przedstawiona problematyka nie wyczerpuje (również ze względów technicznych) całości bibliografii związanej z zagadnieniami kształtowania plastycznego materiałów porowatych. Pozwala jednak, poprzez konfrontację poglądów różnych autorów. na zorientowanie się w głównych kierunkach badawczych, jak również na systematykę problemów związanych z wyjaśnieniem mechanizmu kształtowania oraz z uwarunkowaniami matematycznego opisu modelu płynięcia plastycznego materiałów porowatych. Aktualnie podstawowym warunkiem efektywnego przygotowania i sterowania procesami technologicznymi jest zastosowanie tzw. wspomagania komputerowego.

Nowoczesny proces technologiczny wymaga zgromadzenia wielu informacji niezbędnych do projektowania poszczególnych operacji. Spowodowało to znaczne wydłużenie czasu dostępu do informacji, który wydłużył się do tego stopnia, że dotychczasowe podejście do projektowania i prowadzenia procesu (ze względu na tradycyjny sposób przepływu informacji) stało się niewydolne i nieużyteczne. W technologiach określanych umownie "konwencjonalnymi" problem ten, z uwagi na długoletnie doświadczenia w ich stosowaniu, ma mniejsze znaczenie. Materiały porowate ze względu na swą budowę wewnętrzną wymagają specyficznego podejścia do rozwiązywania zagadnień plastycznego płynięcia. W literaturze brakuje opisów modeli i badań eksperymentalnych traktujących problem w ujęciu probabilistycznym. Stworzenie uzasadnionych naukowo podstaw projektowania procesów kształtowania odkuwek ze spieków wymaga:

- określenia wpływu nierównomierności zagęszczania spiekanej przedkuwki na rozkład gęstości dla różnych schematów odksztalcenia,
- opracowania podstaw teoretycznych kształtowania plastycznego materiałów porowatych z uwzględnieniem zarówno nierównomierności odkształceń, jak również procesu umocnienia materiału osnowy,
- opracowanie metod symulacji plynięcia plastycznego materiałów porowatych,

 opracowania metodyki umożliwiającej doświadczalną weryfikację przyjętego modelu rozwiązania.

Dokonany przegląd literaturowy wskazuje jednoznacznie, że rozbieżności pomiedzy prezentowanymi modelami a wynikami badań doświadczalnych wynikają głównie z nieuwzględnienia lub niewłaściwego ujęcia wpływu nierównomierności spiekanej przedkuwki, umocnienia materiału osnowy, warunków i mechanizmu utraty spóiności itp. W prezer towanych w pracach [8; 11; 17; 22; 35; 40; 45; 106] wynikach prób prasowania potwierdzonych również przez wyniki dotychczasowych badań własnych autora uwidoczniono istotny wpływ odkształcenia postaciowego spieku w procesie kształtowania na własności końcowe odkuwki. W procesach kształtowania spiekanych przedkuwek istotną rolę odgrywa geometria przedkuwki w stosunku do kształtu wykroju ksztaltującego. Wiąże się to ze schematem stanu naprężeń i odkształceń w odkuwce. Właściwie skonstruowany wykrój powinien zapewniać maksymalne i równomierne zagęszczanie odkuwki nie tylko poprzez zagęszczanie (prowadzące do wystąpienia dużych nacisków i tym samym do obniżenia trwałości narzędzi), ale przede wszystkim poprzez płynięcie spieku. Wielkość odkształceń nie powinna jednak prowadzić do wystąpienia lokalnej utraty spójności i wzrostu porowatości. Stworzenie właściwie udokumentowanych zasad kształtowania plastycznego na zimno materiałów porowatych znacznie rozszerzy zakres stosowania wyrobów z proszków metali w przemyśle, szczególnie przeznaczonych na wysoko obciążone części mechanizmów.

# 2. ZAŁOŻENIA I TEZA PRACY

W własne ściach eksploatacyjnych wyrobów wytwarzanych metodami metalurgii proszków dec/duje obok składu chemicznego gęstość, która warunkuje możliwy do osiągnięcia poziom własności użytkowych. Kształtowanie plastyczne materiałów porowatych oprócz zmiany kształtu prowadzi również do znaczego wzrostu gęstości. Gęstość zależy od stanu naprężeń i wielkości lokalnych odkształceń plastycznych nadanych w procesie przeróbki plastycznej. Ponieważ zarówno gęstość początkowa, jak i odkształcenie lokalne są nierównomierne w objętości kształtowanego spieku, należy również uwzględnić wpływ tego czynnika na gęstość końcową, zwracając uwagę na szczególnie niekorzystny wpływ stanu naprężeń  $(J_1 > 0)$ , prowadzący do pojawienia się pęknięć w odkuwce. Uzyskanie pełnej informacji o rozkładzie lokalnej porowatości, rozkładzie lokalnych odkształceń jest niezbędne do prawidłowego projektowania procesów kształtowania plastycznego materiałów porowatych.

W nowoczesnych technologiach (a do takich należy szeroko pojęte przetwórstwo materiałów porowatych) utrudnione jest wytwarzanie wyrobów o powtarzalnych i optymalnych dla danego materiału i procesu własnościach bez wspomagania komputerowego. Szersze wdrożenie tych metod w przemyśle wymaga przeprowadzenia badań obejmujących między innymi: opracowanie modeli fizykalnych zjawisk, opracowanie metodyk weryfikujących stopień ich poprawności oraz zebranie niezbędnych dla praktyki przemysłowej baz danych.

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania modelu symulującego procesy kształtowania odkuwek osiowo symetrycznych oraz opracowania eksperymentalnej bazy danych umożliwiającej jego weryfikację praktyczną.

W pracy przyjęto następującą tezę naukową:

Poprzez dobór kształtu i wymiarów materiału wsadowego w stosunku do gotowej odkuwki można w sposób zamierzony wpływać na rozkład lokalnych odkształceń niezbędnych do uzyskania wymaganej gęstości w warunkach korzystnych stanów naprężeń.

W celu udowodnienia postawionej tezy przeprowadzono:

 analizę teoretyczną obejmującą opracowanie modelu zagęszczania materiałów porowatych na zimno z uwzględnieniem nierównomierności gęstości i umocnienia osnowy,  badania eksperymentalne wpływu sposobu kształtowania na gęstość końcową oraz ustalenie wpływu warunków kucia na cechy geometryczne i rozkład gęstości końcowej w odkuwce.

Uzyskane w pracy zależności powinny w efekcie stworzyć podstawy do opracowania i wdrożenia profesjonalnych programów komputerowego wspomagania procesów projektowania technologii kształtowania plastycznego na zimno materiałów porowatych.

# **3. BADANIA WŁASNE**

#### 3.1. Program badań

Kompleksowa analiza procesu plastycznego płynięcia spieków wymaga opracowania modelu plastycznego płynięcia, zebrania bazy danych eksperymentalnych oraz opracowania metody umożliwiającej statystyczną weryfikację przyjętego modelu. W przyjętym programie badań (rys. 3.1) szczególną uwagę zwrócono na:

- matematyczny opis oraz komputerową symulację płynięcia materiału porowatego w różnych warunkach stanu naprężeń,
- ustalenie wpływu sposobu kształtowania na rozkład nieciągłości wewnętrznych,
- analize statystyczną stopnia dopasowania modelu do wyników badań eksperymentalnych.

Uzyskane wyniki powinny stanowić podstawę do opracowania profesjonalnych programów komputerowego projektowania procesów technologicznych (CAE) stosowanych w metalurgii proszków, a w szczególności projektowania technologii wytwarzania wyrobów przeznaczonych do pracy w warunkach podwyższonych obciążeń dynamicznych.

#### 3.1.1. Dobór materiałów do badań

Zrealizowanie przyjętych w pracy zamierzeń wymagało starannego doboru materiału wsadowego. Materiały porowate przeznaczone do kształtowania plastycznego na zimno powinna cechować:

- plastyczność technologiczna umożliwiająca kształtowanie na zimno,
- podatność do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, zapewniająca otrzymanie prawidłowych warstw wierzchnich,
- trwałość eksploatacyjna umożliwiająca stosowanie ich w miejsce odkuwek ze stali średniostopowych.

Ocena podatności do kształtowania plastycznego na zimno spieków z proszków żelaza wykonanych z różnych mieszanek, jak również wpływ parametrów procesu wytwarzania spieków na własności odkuwek były przedmiotem badań własnych autora i zostały opisane w pracach [60-63; 67]. W badaniach tych dokonano oceny przydatności mieszanek proszków żelaza z weglem i dwusiarczkiem molibdenu (wytwarzanych przez różnych producentów) do kształtowania na zimno.



Rys. 3.1. Program badań własnych. Fig. 3.1. Experimental programme.

Tablica 3.1

Numer serii Skł. chem. [%]	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Cu	1,480	1,480	1,480	1,480	0,930	0,930	0,930	0,930	1,050	1,050	1,050	1,050
Ni	1,720	1,720	1,720	1,720	1,250	1,250	1,250	1,250	1,150	1,150	1,150	1,150
Mn	0,570	0,570	0,570	0,570	0,420	0,420	0,420	0,420	0,470	0,470	0,470	0,470
SiO2	0,015	0,015	0,015	0,015	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Fe	Reszta	Reszta	Reszta	Reszta	Reszta	Reszla	Reszta	Reszta	Reszta	Reszta	Reszta	Reszta
Rodzaj proszku	Distaloy SA				RFel			Manesmann RZ 150				
Dodatki	wprowadzone do mieszanki			wprowadzone do mieszanki			wprowadzone do mieszanki					
С	0,01	0,20	0,01	0,20	0,02	0,20	0,02	0,20	0,03	0,20	0,03	0,20
MoS <sub>2</sub>	1,00			1,00	1,00			1,00	1,00			1,00
Stearynian cynku	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Sklad chemiczny mieszanek stosowanych w badaniach porównawczych

W niniejszej pracy badaniami objęto spieki wykonane z mieszanek o składach chemicznych zestawionych w tablicy 3.1 i gęstościach nominalnych  $\vartheta = 0,8$  i  $\vartheta = 0,9$ . Gęstości te są normalnie stosowanymi w procesach konwencjonalnych i nie wymagają wysokich nacisków prasowania. Z przygotowanych mieszanek wykonano próbki walcowe o średnicy 20,1 mm i wysokości 19,6 mm (średnio), stosując naważki 45 g i 34 g oraz naciski odpowiednio  $p_1 = 306$  MPa i  $p_2 = 673$  MPa. Spiekanie prowadzono w atmosferze wodoru w temp. 1150°C i czasie 1,5 h.

#### 3.1.2. Dobór sposobu kształtowania

Zasadniczym celem procesów kształtowania na zimno materiałów porowatych jest obok nadania wymaganego kształtu wytworzenie w odkuwce warunków do likwidacji nieciągłości wewnętrznych, a tym samym do wzrosty gęstości odkuwki.

Analizując płynięcie materiału w procesach kucia odkuwek osiowo-symetrycznych, w objętości odkuwki wyszczególnić można podstawowe schematy kształtowania (rys. 3.2): spęczanie swobodne, spęczanie z ograniczonym poszerzeniem, wgłębianie ze swobodnym poszerzeniem, wgłębianie z ograniczonym poszerzeniem, wyciskanie współbieżne ze swobodnym poszerzeniem, wyciskanie współbieżne z ograniczonym poszerzeniem.



Rys. 3.2. Schematy kształtowania odkuwek osiowo-symetrycznych: a) spęczanie swobodne, b) spęczanie z ograniczonym płynięciem, c) wyciskanie współbieżne swobodne, d) wyciskanie współbieżne z ograniczonym płynięciem,
e) wgłębianie swobodne, f) wgłębianie z ograniczonym płynięciem.

Fig. 3.2. Schemes of forming of axially-symmetrical forgings: a) free upsetting, b) upsetting with restricted flow, c) free forward extrusion, d) forward extrusion with restricted flow, e) free backward extrusion, f) backward extrusion with restricted flow. Przyjęcie wyżej wymienionych schematów w badaniach własnych pozwoli na kompleksową ocenę charakteru płynięcia materiałów porowatych w procesach kucia odkuwek osiowo-symetrycznych.

# 3.1.3. Warunki prowadzenia prób kształtowania

Próby kształtowania prowadzono w specjalnie skonstruowanym przyrządzie umożliwiającym realizację założonych sposobów obciążenia (rys. 3.3). Przyrząd dostosowano do maszyny wytrzymałościowej ZDTeJ-30. Maszyna została wyposażona



Rys. 3.3. Przyrząd stosowany do prób kształtowania. Fig. 3.3. A device used for experimental forming. w system elektronicznych czujników oraz system rejestracji wyników Dialog-ADU współpracujący z komputerem IBM-PC. System ten umożliwia dokładną rejestrację sił, przemieszczeń, momentu skręcającego i ciśnień wewnętrznych.

### 3.2. Metodyka badań

Rozwiązanie podjętych w pracy zamierzeń wymagało zastosowania metod badawczych pozwalających na uzyskanie jednoznacznych zależności pomiędzy wielkościami wpływowymi a cechami wynikowymi. Do podstawowych problemów badawczych stojących przed autorem niniejszej rozprawy należało opracowanie metod umożliwiających:

- określenie rozmieszczenia porowatości na przekroju,
- ocenę odkształceń granicznych spieków,
- ocenę zgodności wyników symulacji komputerowej z wynikami eksperymentu.

#### 3.2.1. Ocena rozmieszczenia porowatości

Zagadnienie ilościowej oceny porowatości oraz wykorzystania jej wyników do analizy płynięcia materiału porowatego autor uznał za jedno z podstawowych. Spośród cytowanych w literaturze [22; 29; 40; 62] i weryfikowanych w badaniach własnych [27; 59; 63; 64] metod ilościowej oceny rozkładu porowatości zdecydowano się na zastosowanie metod metalografii ilościowej. Metody te dzięki postępowi w konstrukcji sprzętu, jak również powszechnemu stosowaniu mikrokomputerów do automatycznej analizy obrazu, pozwalają na gromadzenie wyników w postaci baz danych z szerokimi możliwościami transformacji. Do niewątpliwych zalet metody należy również prosta w porównaniu z innymi technikami preparatyka. W niniejszej pracy badania przeprowadzono z użyciem telewizyjnego analizatora obrazu Quantimet 720. Powierzchnię zgładu podzielono siecią (zgodnie z podziałem zastosowanym w metodzie elementów skończonych) na elementarne pola obserwacji. Dla każdego z tych pół wyznaczono udział powierzchniowy nieciągłości  $A_a$  w zakresie od 0,0 do 0,4 w klasach o szerokości 0,04, parametr ten według [16; 29] w pełni charakteryzuje lokalne rozmieszczenie porowatości na przekroju materiału.

# 3.2.2. Określenie odkształcalności granicznej

W praktyce przemysłowej szansę najszerszego zastosowania znajdą, zdaniem autora, odkuwki kształtowane na zimno ze spieków na osnowie proszków żelaza. Odkuwki te mogą być przydatne szczególnie dla przemysłu elektromaszynowego i motoryzacyjnego. Dla tych wyrobów materiałem wsadowym jest spiek o określonej gęstości uzyskanej w procesie prasowania i spiekania proszku. Sposób kształtowania sterowany głównie geometrią spieku w stosunku do geometrii gotowego elementu ma znaczący wpływ na porowatość końcową i tym samym własności finalne wyrobu.

W badaniach własnych jako parametr charakteryzujący podatność spieku do przeróbki plasycznej na zimno przyjęto odkształcenie graniczne określone w próbie swobodnego spęczania z tarciem (rys. 3.4). Próba ta wykazuje wiele zalet [30]



przemawiających za jej przyjęciem, m.in.:

- szczegółowo udokumentowane literaturowo zmiany stanu naprężeń i odkształceń podczas procesu,
- łatwość określenia momentu utraty spójności,
- nieskomplikowane warunki prowadzenia próby i przygotowania próbek.

#### Rys. 3.4. Sposób określania odkształcenia granicznego w próbie spęczania.

Fig. 3.4. Determination of strain limit in the upsetting test.

Jako miarę odkształcenia przyjęto odkształcenie zastępcze określane z zależności:

$$\begin{split} \phi_{z} &= \sqrt{\varphi_{1}^{2} + \varphi_{1}\varphi_{2} + \varphi_{2}^{2}} \\ \phi_{1} &= \ln \frac{a_{1}}{a_{0}} \quad ; \quad \phi_{2} &= \ln \frac{d_{1}}{d_{0}} \end{split}$$

# 3.3. Symulacja komputerowa płynięcia plastycznego materiałów porowatych

Symulacja procesu technologicznego lub procesu projektowania jest obecnie bardzo efektywnym narzędziem ze względu na swoją użytkowość, to jest łatwość wprowadzania danych, generacji wyników itp. Celem podstawowym symulacji jest modelowa weryfikacja procesu lub konstrukcji, czyli sprawdzenie, czy zapropowane rozwiązanie spełnia sformułowane wcześniej wymagania z określoną dokładnością. Na rys. 3.5 przedstawiono podstawowe problemy związane z zastosowaniem metod symulacji komputerowej. Problemem kluczowym przy budowie modelu komputerowego jest jego zgodność z modelem formalnym. Zagadnienie to, nazywane zagadnieniem weryfikacji modelu, nie doczekało się dotychczas zadowalającego rozwiązania [21].



Rys. 3.5. Podstawowe problemy symulacji komputerowej. Fig. 3.5. Basic problems of computer simulation.

Złożoność współczesnych problemów technicznych wymaga coraz częściej stosowania w miejsce układów zdeterminowanych, układów stochastycznych lub probabilistycznych. Problematykę badań modelowych w zastosowaniu do badań materiałów narzędziowych szczegółowo omawia J. Cwajna w pracy [16], gdzie szczególną uwagę zwraca on na probabilistyczny charakter wzajemnych zależności występujących w procesach rzeczywistych.

Metody symulacji komputerowej wymagają zgromadzenia baz informacji, opracowania niezbędnych modeli abstrakcyjnych oraz sposobów weryfikacji zarówno formalnej, jak i eksperymentalnej. Podczas badań symulacyjnych pojawia się często problem adekwatności modelu, czyli dokładności oraz zakresu stosowalności. Złożoność współczesnych problemów techniczo-projektowych, a w szczególności ilość i zakres niezbędnych informacji, wymagają skrócenia czasu dostępu do informacji, jak również zwiększenia jej jednoznaczności. Rozwój metod symulacyjnych i ich rozpowszechnienie było ściśle związane z rozwojem bazy mikrokomputerów profesjonalnych. Dostępna obecnie technika obliczeniowa pozwala na rozwiązywanie nawet bardzo złożonych zagadnień teoretycznych bez istotnego wydłużenia czasu obliczeń. Prawidłowe podejście do rozwiązywania problemów weryfikacji modelowej wymaga:

- zgromadzenia niezbędnych baz danych charakteryzujących badany obiekt,
- opracowania modelu adekwatnego do rozwiązywanej problematyki,
- zastosowania efektywnej metody symulacyjnej,
- opraco vania metody umożliwiającej porównanie z założoną dokładnością badanego obiektu z modelem.

Kluczowym problemem przy budowie tzw. symulacyjnego modelu komputerowego jest zgodność z modelem formalnym oraz adekwatność metody weryfikacyjnej [21]. Modelowanie procesów płynięcia plastycznego materiałów porowatych wymaga:

- adekwatnego opisu modelu plastycznego płynięcia,
- wyboru optymalnej metody testowania modelu,
- opracowania metod weryfikujących poprawność zastosowanych rozwiązań.

W procesach kształtowania plastycznego na zimno materiałów porowatych w materiale wsadowym występuje zróżnicowanie gęstości będące efektem zróżnicowania lokalnych warunków podczas zagęszczania i spiekania proszku wsadowego. Modelowanie struktury materiału porowatego jest bardzo utrudnione ze względu na brak jednoznacznego opisu zależności występujących w procesach zagęszczania i spiekania. Uwzględnienie zróżnicowania cech strukturalnych w materiale wsadowym wymaga wprowadzenia w opracowywanej metodzie symulacyjnej czynnika probabilistycznego. W literaturze brakuje jednoznacznego opisu metod tzw. symulacji stochastycznej. W. Findeistein [21] proponuje dwuetapowy tok postępowania: w pierwszym etapie budowa modelu deterministycznego, a następnie wprowadzenie przebiegu losowego o cechach probabilistycznych adekwatnych do systemu rzeczywistego i weryfikacja jego wpływu na tle rozwiązania podstawowego.

# 3.3.1. Metodyka badania modelu matematycznego

Na podstawie przeprowadzonego uprzednio przeglądu literatury zauważyć można, że do analizy płynięcia najszersze zastosowanie znalazła metoda elementów skończonych (MES). Metoda ta, stosowana uprzednio tylko do rozwiązywania zagadnień teorii sprężystości oraz analizy konstrukcji w chwili obecnej poprzez odpowiedni dobór warunków brzegowych, jak również przyjęcie małego kroku obliczeniowego pozwala na rozwiązywanie skomplikowanych zagadnień krzywoliniowych. W ostatnim dziesięcioleciu dzięki uproszczeniu dostępu do szybkich jednostek obliczeniowych metoda ta stała się wręcz programem narzędziowym do analizy wielu procesów kształtowania plastycznego materiałów konwencjonalnych [94; 95; 107; 108; 125].

Próbę zastosowania MES do symulacji płynięcia materiałów porowatych podjął między innymi G. L. Petrosjan [92]. Opracował on model płynięcia i stworzył podstawy do szerszego stosowania MES w analizie procesów. Wiele wątpliwości budzą jednak przedstawione metody weryfikacji eksperymentalnej wyników.

62

W niniejszej pracy skoncentrowano się głównie na zastosowaniu metody elementów skończonych do symulacji plastycznego płynięcia materiałów porowatych. Analiza objęto procesy (rys. 3.2):

- spęczania swobodnego,
- spęczania z ograniczonym płynięciem promieniowym uzależnionym od stosunku średnicy odkuwki do średnicy matrycy,
- wyciskania współbieżnego swobodnego,
- wyciskania współbieżnego z ograniczonym płynięciem promieniowym.
- wyciskania przeciwbieżnego swobodnego,
- wyciskania przeciwbieżnego z ograniczonym płynięciem promieniowym.

Przyjmując symetrię osiową procesu, obszar odkształcanego materiału (połowa przekroju walca) podzielono na dwieście elementów (rys. 3.6).

Poprzez odpowiedni dobór wartości średnic  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  w stosunku do średnicy materiału wsadowego możliwa jest realizacja założonych sposobów obciążenia, np.:

- dla  $D_2 = D_3 = D_1 = D_w$
- dla  $D_1 \gg D_w$  i  $D_2 \gg D_w$
- dla  $D_1 < D_3$  i  $D_2 = D_3$
- dla  $D_1 = D_3$  i  $D_2 < D_3$

- ⇒ spęczanie w zamkniętej matrycy,
- => spęczanie swobodne,
- ⇒ wyciskanie przeciwbieżne,
- wyciskanie współbieżne itp.



Współczynnik płynięcia bocznego  $W_{pk}$  określany jako stosunek średnicy wsadu  $D_w$  do średnicy matrycy  $D_3$ warunkował stopień ograniczenia płynięcia promieniowego kształtowanego materiału (rys. 3.6, tablica 4.1).

Niżej przedstawiono podstawowe równania dla przyjętego obszaru analizy (kształtowanie osiowo--symetryczne) - rys. 3.7.

Ogólne równanie równowagi:

 $\mathbf{M}\boldsymbol{\bar{u}} + \mathbf{H}\boldsymbol{\dot{u}} + \mathbf{K}\boldsymbol{u} = \mathbf{R} \tag{3.1}$ 

dla analizy statycznej przyjęto jako:

 $\mathbf{K}\boldsymbol{\mu} = \mathbf{R} \tag{3.2}$ 

Przemieszczenie węzla określono zależnością:

$$\{\mathbf{U}_i\} = \begin{cases} \mathbf{z}_i \\ \mathbf{v}_i \end{cases}$$
(3.3)

Przemieszczenie elementu natomiast:

 $\left\{\mathbf{U}\right\}_{R} = \begin{cases} u_{l} \\ u_{j} \\ u_{k} \\ u_{l} \end{cases}$ (3.4)

Rys. 3.6. Sposób podziału obszaru rozwiązania.

Fig. 3.6. Partition of the solution area.



Rys. 3.7. Schemat przyjętego sposobu rozwiązania. Fig. 3.7. Scheme of the assumed calculation procedure.

Przemieszczenie dowolnego punktu:

$$\{\mathbf{f}\} = \begin{cases} u \\ v \end{cases} = [IN_i, IN_j, IN_k, IN_i] \{u\}_e$$
(3.5)

Macierz funkcji kształtu przyjęto w postaci:

$$[N] = [N_i, N_j, N_k, N_l]; \qquad N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix}$$
(3.6)

Funkcję kształtu przyjęto w postaci:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 - \xi_i \xi) (1 - \eta_i \eta)$$
(3.7)

Odkształcenia z kolei:

$$\left\{\varepsilon\right\}_{\varepsilon} = \begin{cases} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_{z} \\ \varepsilon_{r} \\ \varepsilon_{\theta} \\ \gamma_{rz} \end{cases} = \begin{cases} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \end{cases}$$
(3.8)

$$\{\varepsilon\}_{e} = [\mathbf{B}]\{u\}_{e} \tag{3.9}$$

$$[\mathbf{B}] = [B_i, B_j, B_k, B_l] \tag{3.10}$$

$$\mathbf{B}_{i} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_{i}}{\partial z} \\ \frac{\partial N_{i}}{\partial r} & 0 \\ \frac{1}{r} N_{i} & 0 \\ \frac{\partial N_{i}}{\partial z} & \frac{\partial N_{i}}{\partial r} \end{bmatrix}$$
(3.11)

Naprężenia określono z zależności:

$$\{\sigma\} = [\mathbf{D}]\{\varepsilon\} + \{\sigma_0\}$$
(3.12)

$$\{\sigma\} = \begin{cases} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{cases} \sigma_{z} \\ \sigma_{r} \\ \sigma_{\theta} \\ \tau_{rz} \end{cases}$$
(3.13)

Energia sprężysta elementu:

$$V = \frac{1}{2} \int_{V} \sigma_{i}^{T} \varepsilon_{i} dV_{i} \quad ; \quad V = \frac{1}{2} \mathbf{P}^{T} u$$
  

$$\sigma^{T} = \varepsilon^{T} \mathbf{D} = u^{T} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D}$$
  

$$V = \frac{1}{2} (2\pi \iint_{F} \int u^{T} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \mathbf{B} ur dr dz) =$$
  

$$= \frac{1}{2} u^{T} (2\pi \iint_{F} \mathbf{B}^{T} \mathbf{D} \mathbf{B} r dr dz) u = \frac{1}{2} u^{T} \mathbf{K}_{e} u$$
(3.14)

# 3.3.2. Podstawowe założenia modelu

Głównym czynnikiem decydującym o adekwatności modelu płynięcia plastycznego jest precyzyjne określenie zależności pomiędzy naciskiem prasowania i gęstościa oraz ilościowe ujęcie wpływu umacniania się osnowy.

W badaniach własnych autor skoncentrował się na poszukiwaniu rozwiązań analityczno-doświadczalnych, gdzie istotne znaczenie ma postać funkcji. Funkcja ta powinna w sposób dokładny aproksymować wyniki eksperymentu, nie wprowadzając jednocześnie własnych osobliwości w postaci nieuzasadnionych fizykalnie minimów lub maksimów. Ważne jest również (ze względu na późniejsze operacje różniczkowania) zachowanie sensu fizykalnego w warunkach brzegowych.

Tablica 3.2

Numer równania	Poz. lit.	Postać funkcji aproksymacyjnej
3.01	[51]	$\vartheta = \vartheta_0 \left[ 1 + (\vartheta^{-n} - 1) \frac{p \exp(c\varphi)}{(1 + A_b)p_k} \right]^{\frac{1}{n}}$
3.02	[126]	$\vartheta = \vartheta_0 \exp\left(\frac{p}{k}\right)$
3.03	[126]	$\ln(1-\vartheta)^{-1} = kp + c$
3.04	[126]	$p = A_1 \ln \left( \frac{1 - \vartheta_0}{1 - \vartheta} \right)$
3.05	[126]	$\gamma = kp^m + \gamma_0$
3.06	[126]	$\log(p_{\max}) - \log(p) = L(\beta - 1)$
3.07	[126]	$\mathfrak{d} = c + d\ln(p)$

Wybrane równania aproksymacyjne krzywej zagęszczania

Przeprowadzone przez autora badania eksperymentalne [51] oraz analiza najczęściej cytowanych w literaturze równań zagęszczania (tablica 3.2) pozwoliły na wyznaczenie optymalnej funkcji aproksymacyjnej (rys. 3.8). Przyjęta funkcja (równanie 3.01 w tablicy 3.2) opiera się na tzw. probabilistycznym modelu prasowania materiałów porowatych [117; 127] i uwzględnia (pomijany z reguły w literaturze) wpływ odkształcenia plastycznego na końcową gęstość odkuwek.



- Rys. 3.8. Wpływ nacisku i odkształcenia na gęstość spieków opisany równaniem przyjętym w badaniach własnych (3.01).
- Fig. 3.8. Effect of pressure and strain on the density of sinters calculated with an assumed formula (3.01).

Następnym czynnikiem mającym istotny wpływ na płynięcie plastyczne spieków jest umacnianie się osnowy. Proces ten dla materiałów konwencjonalnych został dobrze opisany w literaturze. Podczas kształtowania plastycznego materiałów porowatych występuje współdziałanie dwóch zjawisk mających istotny wpływ na wartość naprężenia uplastyczniającego:



W literaturze brakuje opracowań ujmujących jednoznacznie wpływ gęstości i umocnienia osnowy na naprężenie uplastyczniające. Podejmowane przez różnych autorów [88; 89; 106] próby uwzględnienia wpływu tego czynnika w modelu płynięcia

ze względu na znaczne uproszczenia w założeniach nie mogą znaleźć szerszego zastosowania. Autor niniejszej pracy podjął próbę oszacowania wpływu umocnienia w dwóch etapach:

- wyznaczenie równania umocnienia dla materiału konwencjonalnego o zbliżonym składzie chemicznym,
- określenie wpływu gęstości spieku na wartość naprężenia uplastyczniającego.

Na rys. 3.9 przedstawiono wpływ gęstości oraz odkształcenia na naprężenie uplastyczniające wyznaczony dla mieszanki o składzie nr 06 (tablica 3.1).



- Rys. 3.9. Krzywe umocnienia dla materiału porowatego  $\vartheta = 0,6$  i litego wyznaczone w próbie ściskania "beztarciowego"  $\sigma_0 = 460$  MPa, C=765, n=0,205, m=0,97,  $\vartheta_{\rm m} = 0,2891$ .
- Fig. 3.9. Hardening curves for a porous  $\vartheta = 0,6$  and dense materials as determined in a "friction-free" compression trial,  $\sigma_0 = 460$  MPa, C = 765, n = 0,205, m = 0,97,  $\vartheta_{ns} = 0,2891$ .

Zależności  $\sigma = f(\varphi)$  oraz  $\Theta = f(\varphi)$  wyznaczono w próbie ściskania quasi-beztarciowego z zastosowaniem przekładek teflonowych. Metoda ta aczkolwiek nie pozbawiona pewnych wad, ze względu na prostą metodykę znalazła szerokie zastosowanie w praktyce laboratoryjnej.

Do matematycznego opisu krzywej umocnienia zastosowano powszechnie stosowane do opisu krzywej umocnienia równanie zaproponowane przez Ludwika. W równaniu tym wprowadzono funkcję poprawkową ujmującą wpływ gęstości bieżącej materiału porowatego - równanie (3.15) i rys. 3.10.

$$\sigma_{pl} = f(\emptyset) (\sigma_0 + C \varphi^n)$$

$$f(\emptyset) = \frac{(\vartheta - \vartheta_m)^n}{(\vartheta_r - \vartheta_m)^n}$$

$$gdzie: f(\emptyset) = \begin{cases} = 1 & dla \ \vartheta = \vartheta_r = 1 \\ = f(\emptyset) \ dla \ \vartheta = \vartheta_m \end{cases}$$
(3.15)

Rys. 3.10. Powierzchnia wzmocnienia materiału porowatego opisana równaniem (3.15). Fig. 3.10. Porous material strenghtening surface according to formula (3.15).

# 3.3.3. Opis programu obliczeniowego

Opracowany w pracy program symulacyjny skonstruowano w sposób umożliwiający porównawczą analizę statystyczną wyników uzyskanych z obliczeń z wynikami eksperymentu. Weryfikację statystyczną prowadzono porównując rozmieszczenia porowatości na przekroju otrzymane z obliczeń z mapą porowatości wyznaczoną dla próbek poddanych tym samym warunkom odkształcenia w badaniach eksperymentalnych. Obliczenia prowadzono na komputerze IBM-PC. Sieć działań programu przedstawiono na rys. 3.11. Po uruchomieniu program wymaga dokonania wyboru:

- schematu kształtowania,
- schematu gniotów,
- nominalnej gęstości początkowej,
- postaci funkcji zagęszczania.

Następnie wybierana jest w sposób losowy z bazy danych próbka o założonej gęstości nominalnej z określoną dla tej gęstości mapą porowatości. Po wykonaniu kroku obliczeniowego generowany jest mapa porowatości, lokalny gradient porowatości powstały w wyniku odkształcenia oraz odkształcenie siatki podziałowej.

W opracowanym algorytmie wprowadzono również opcję pozwalającą na alternatywne testowanie modelu, jak również jego weryfikację statystyczną dla wybranych zależności  $\Theta = f(p)$  lub  $\Theta = f(\varphi)$ .

# 3.3.4. Statystyczna weryfikacja modelu

Jednym z ważniejszych problemów było opracowanie metodyki umożliwiającej jednoznaczną ocenę stopnia zgodności wyników uzyskanych z obliczeń z wynikami eksperymentu. Probabilistyczny charakter własności materiału porowatego znacznie skomplikował problem oceny statystycznej. Uniemożliwił on bezpośrednie zastosowanie metody najmniejszych kwadratów i testu  $\chi^2$  dla weryfikacji stopnia przybliżenia modelu symulacyjnego do warunków rzeczywistych. Weryfikacja statystyczna musi bowiem uwzględniać (wynikającą z technologii) niejednorodność rozkładów nieciągłości w materiałe wsadowym.

Opracowana metoda weryfikacji opiera się na estymacji przedziałowej rozkładu średniego udziału powierzchniowego dla każdego pola próbki, obliczeniu wskaźnika procentowego określającego liczbę danych eksperymentalnych mieszczących się w skonstruowanym przedziale ufności i statystycznym testowaniu istotności tego wskaźnika. Ocenę zróżnicowania porowatości w materiale wsadowym (spieku) dokonano dla 50 losowo wybranych próbek z każdej gęstości zastosowanej w badaniach własnych. Dla próbek tych wyznaczono eksperymentalnie mapy porowatości (udziału powierzchniowego nieciągłości). Mapy te stanowią jednocześnie zbiór wejściowy materiałów wsadowych dla symulacji komputerowej. Pozostałe próbki poddano odkształceniom



Rys. 3.11. Sieć działań programu symulacyjnego. Fig. 3.11. Working network of the simulation programme. wyznaczając po każdym gniocie mapę porowatości. Wyniki te stanowią zbiór danych eksperymentalnych. Dla tych samych warunków wykonano obliczenia modelowe rozmieszczenia porowatości. Dane te stanowiły zbiór danych modelowych. Na podstawie danych uzyskanych z obliczeń dla pięćdziesięciu próbek po każdym gniocie obliczano średnią porowatość w każdym polu próbki korzystając z zależności:

$$(\bar{A}_A)_i^m = \frac{1}{50} \sum_{j=1}^{50} (A_A)_{ij}$$
 (3.16)

Odchylenie standardowe dla każdego pola próbki wynosi:

$$S_{i}^{m} = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{j=1}^{50} ((A_{A})_{ij} - (\bar{A}_{A})_{j})^{2}}$$
(3.17)

Otrzymano w ten sposób rozmieszczenie udziału powierzchniowego nieciągłości dla średniej modelowej. Jego parametry opisują statystykę rozrzutu porowatości w badanej populacji po każdym gniocie. Pozwoliło to na określenie dla każdego pola próbki przedziału ufności o następujących parametrach:

$$\left\langle \left(\bar{A}_{A}\right)_{i}^{m}-S_{i}^{m}\right\rangle ;$$
  $\left(\bar{A}_{A}\right)_{i}^{m}+S_{i}^{m}\right\rangle$  (3.18)

Po sprawdzeniu dla każdego pola ilości danych eksperymentalnych mieszczących się w przedziale ufności określono wartość oczekiwaną porowatości lokalnej jako:

$$\Theta_{lok} = \frac{N_p}{6.200} \tag{3.19}$$

Korzystając z zależności (3.20) obliczono wartość średnią udziału powierzchniowego nieciągłości dla każdego pola próbek eksperymentalnych:

$$(\bar{A}_{A})_{i}^{e} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{6} (A_{A})_{ij}$$
(3.20)

Stosunek różnicy wartości średniej wyników otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i otrzymanych z obliczeń do odchylenia standardowego określonego dla danego pola próbki modelowej jest miarą lokalnego dopasowania wyników modelowych do danych eksperymentalnych:

$$D_{i} = \frac{|(\bar{A}_{A})_{i}^{m} - (\bar{A}_{A})_{i}^{e}|}{S_{i}^{m}}$$
(3.21)

Współczynnik  $D_i$  określa dopasowanie modelu uwzględniając różnorodność map porowatości w populacji próbek. Parametr ten poddano analizie statystycznej w celu oceny jego istotności, a właściwie istotności różnicy tego wskaźnika i wskaźnika teoretycznego. Wskaźnik teoretyczny wyznaczono określając dla przyjętego sposobu postępowania liczbę danych eksperymentalnych, które powinny się mieścić wewnątrz przedziału przy założeniu poziomu istotności p = 0,95. W odniesieniu do tej liczby możemy analizować poprawność uzyskanych rozwiązań.

W celu analizy statystycznej mającej ocenić stopień zbliżenia wyników otrzymanych z badań symulacyjnych do wyników eksperymentu opracowano według przedstawionego wyżej toku postępowania trzy podprogramy stanowiące bloki zasadniczego programu symulacyjnego:

- 1. Podprogram translac służący do przygotowania zbioru baz wejściowych zawierających wyniki obliczone oraz wyniki eksperymentalne w formacie umożliwiającym ich analizę statystyczną.
- 2. Podprogram statys przeprowadzający właściwą weryfikację statystyczną według przyjętej w pracy metody. W trakcie obliczeń dla każdego pola zapisywane są: numer pola, wartość średnia udziału powierzchniowego nieciągłości dla wyników eksperymentalnych i obliczonych z modelu, odchylenie standardowe oraz różnica wartości średnich. Po wykonaniu obliczeń dla całego obszaru objętego analizą zapisywane są: liczba pól, dla których wyniki mieszczą się w przyjętych przedziałach, wskaźnik wyrażający tę wartość w procentach w stosunku do liczby wszystkich pól poddanych analizie, jak również teoretyczny wskaźnik wynikający z przyjętego poziomu ufności oraz istotność różnicy tych wskaźników.
- 3. Podprogram weryf szacuje statystycznie dopasowanie modelu do przyjętego wzorca.

Przeprowadzone testy statystyczne pozwalają na ocenę dokładności uzyskanych wyników.

# 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

#### 4.1. Materiał wsadowy

Ocena podatności spieków metalicznych do kształtowania plastycznego na zimno była przedmiotem kompleksowych badań prowadzonych przez autora [56; 58; 59; 62]. Badania te miały na celu opracowanie kryteriów doboru materiałów porowatych do kształtowania plastycznego na zimno oraz opracowanie technologii wytwarzania odkuwek ze spieków.

Celem utylitarnym prowadzonych w latach 1985-1990 badań [61; 64-74] było określenie możliwości wdrożenia w przemyśle odkuwek kształtowanych ze spiekanych przedkuwek wykonanych z krajowych surowców (proszki ZM Trzebinia). Korzystając z tych wyników przeprowadzono w pracy analizę porównawczą podstawowych własności spieków z proszków RFe1 z proszkami Distaloy SA oraz RZ 150. Badania porównawcze prowadzono na podstawie wyników pomiarów zgęszczalności według PN-82/H-04931, gęstości według PN-74/H-04934, twardości według PN-69/H-04937, własności mechanicznych według PN-70/H-04937 oraz odkształcalności granicznej. Porównanie podstawowych własności materiałów stosowanych do badań przedstawiono na rys. 4.1.

Wyniki badań [63; 66; 68-69] wpływu parametrów technologicznych wytwarzania spieków z proszku RFe1 na jego podatność technologiczną pozwoliły uzyskać materiał nadający się do zastosowania go jako wsadu do kucia odkuwek przeznaczonych na elementy pracujące w warunkach podwyższonych obciążeń dynamicznych (koła zębate, tarcze sprzegieł itp.).

Wzrost plastyczności proszku RFe1 osiągnięto przez wyżarzanie go i wprowadzenie do mieszanki 1% dwusiarczku molibdenu. Dzięki temu uzyskano plastyczność porównywalną z plastycznością spieku z czystego proszku, mimo 0,2% zawartości wegla w mieszance. W badaniach tych określono również wymaganą z punktu widzenia procesów kształtowania plastycznego na zimno gęstość wstępną spieku (rys. 4.2). Wynosi ona od 0,8 do 0,9 ( $\rho$ =6,3 do 7,1 g/cm<sup>3</sup>) gęstości teoretycznej. Gęstość ta umożliwia odkształcenie spieku pozwalające na jego duże zagęszczenie, nie powodując lokalnej utraty spójności. Gęstości te są również typowe dla procesów zagęszczania konwencjonalnego i nie wymagają wysokich nacisków prasowania. Charakter krzywych odkształcenia granicznego (rys. 4.2) wskazuje na znaczący wpływ porowatości na plastyczność technologiczną materiału porowatego. Niezależnie od użytego rodzaju proszku (jak również wprowadzonych do mieszanki dodatków) ich przebieg cechuje znaczne podobieństwo, dlatego można wnioskować o istnieniu tzw. **gęstości minimalnej**, poniżej której znacznie maleje wartość odkształcenia granicznego. Można to tłumaczyć występowaniem zjawiska tzw. krytycznego nasycenia




Properties of the sinters manufactured wysokiej odporności na ścieranie Fig. 4.1. from the mixtures used in experimental warstwy wierzchniej. Do badań works.

mikropeknieciami wprowadzonego do badań odkształcalności granicznej przez Kolmogorowa:

"Jeżeli ilość mikronieciągłości będących zarodkami mikropęknięć przekroczy nasycenie krytyczne, to występuje ich lawinowa generacja i rozrost, co w efekcie powoduje utrate spójności makroobjętości" w [116].

Dla badanych mieszanek gęstość krytyczna występuje poniżej 0,8 gęstości teoretycznej spieku. Na rys. 4.3 zestawiono plastyczność technologiczna spieków dla dwóch gestości nominalnych  $\vartheta = 0.8$  i  $\vartheta = 0.9$ .

Wyniki badań potwierdziły w pełni przydatność spieków wykonanych z krajowego proszku żelaza (RFe1) do kształtowania plastycznego na zimno. Proszek ten, aczkolwiek dla podwyższenia jego plastyczności wymaga zastosowania dodatkowej operacji wyżarzania, w efekcie umożliwia uzyskanie wyrobów o własnościach w pełni porównywalnych z własnościami wyrobów wytwarzanych z proszków importo-Spieki wykonane z wanych. proszku RFe1 żarzonego cechowały się wprawdzie niższymi własnościami wytrzymałościowymi w stanie surowym (rys. 4.1), jednak duża plastyczność pozwalająca na uzyskanie wysomieszanek kich gęstości w odkuwce umożliwia ich stosowanie na wyroby o eksperymentalnych weryfiku-

74



- Rys. 4.2. Wpływ gęstości spieku na podatność do odkształceń plastycznych dla czystych proszków (a) oraz z dodatkiem węgla i MoS<sub>2</sub> (b).
- Fig. 4.2. Effect of the sinter density on the deformability of (a) pure powders and (b) powders with carbon and  $MOS_2$  additions.



Rys. 4.3. Plastyczność technologiczna spieków wykonanych z mieszanek stosowanych w badaniach własnych.

Fig. 4.3. Technological deformability of the sinters manufactured from the prepared mixtures.

75

jących wyniki badań symulacyjnych zastosowano spieki wykonane z mieszanki oznaczonej nr 08 (tablica 3.1). W mieszance tej wprowadzono 1% dodatek dwusiarczku molibdenu. Dodatek ten wpływa na wzrost plastyczności technologicznej spieku oraz własności odkuwki po obróbce cieplnej i cieplno-chemicznej [66; 68; 69].

4	Gęstość nominalna ϑ=0,8
+	Gęstość nominalna ϑ=0,9
	+

#### Legenda:

θ=0,00÷0,04 →	9	θ=0,00÷0,04 →	8
θ=0,08÷0,12 →	7	$\Theta = 0, 12 \div 0, 16 \rightarrow$	6
$\Theta = 0,16 \div 0,20 \rightarrow$	5	Θ=0,20÷0,24 →	4
θ=0,24÷0,28 →	3	⊖=0,28÷0,32 →	2
$\Theta = 0.32 \div 0.36 \rightarrow$	1	$\Theta = 0,36 \div 0,40 \rightarrow$	0

Rys. 4.4. Przykładowe rozmieszczenia porowatości lokalnej dla gęstości stosowanych w badaniach własnych.

Fig. 4.4. Some examples of local porosity distribution for the density range covered in the experimental works.

W materiałach porowatych występuje nierównomierne rozmieszczenie porowatości będące efektem procesu prasowania (rys. 4.4). Porowatość, a szczególnie jej rozmieszczenie wywierają znaczny wpływ na lokalną odkształcalność graniczną i w warunkach niekorzystnych stanów naprężeń  $J_1 > 0$  są przyczyną powstawania pęknięć w odkuwce. Dla oceny tego zjawiska wykonano badania mające na celu ujęcie wpływu rozkładu porowatości początkowej na płynięcie plastyczne spieku.

Statystyczną ocenę rozmieszczenia porowatości na przekroju prowadzono dla 100 próbek losowo wybranych z przygotowanego materiału badawczego (po 50 sztuk dla gęstości  $\vartheta = 0.8$  i  $\vartheta = 0.9$ ). Dane te stanowią również bazę o rozmieszczeniu lokalnej porowatości w materiałach wsadowych do opracowanego programu symulacyjnego.

Gęstość	А	В	С
v=0,8			
v=0,9			



- Rys. 4.5. Mikrostruktury wybranych obszarów spieków dla gęstości stosowanych w badaniach własnych.
- Fig. 4.5. Microstructure of the selected areas of the sinters for the density range covered in the experimental works.

Na rys. 4.5 przedstawiono mikrostruktury charakterystycznych obszarów próbek. Dla umożliwienia porównania charakteru struktur prezentowanych w pracy wszystkie zdjęcia metalograficzne wykonane zostały z tym samym powiększeniem 100x.

Analizując uzyskane mapy rozmieszczenia porowatości można zauważyć występowanie ogólnych prawidłowości będących efektem dwustronnego prasowania proszków (strefy o zróżnicowanej gęstości będące skutkiem oddziaływania sił tarcia w matrycy). Wraz ze wzrostem gęstości wzrasta wyraźnie jej zróżnicowanie będące skutkiem udziału stref odkształcenia. W strefie środkowej zaznaczony jest obszar o obniżonej porowatości wywołany oddziaływaniem podczas zagęszczania stref odkształcenia. Widoczny jest również obszar oddziaływania sił tarcia pomiędzy stemplem a prasowanym materiałem. Im mniejsza gęstość spieku, tym mniej wyraźny jest rozdział na strefy odkształceń. Dla gęstości niższych od ok. 60% gęstości teoretycznej zanika oddziaływanie stref odkształceń podczas prasowania proszku.

#### 4.2. Próby kształtowania

Weryfikację praktyczną dokładności opracowanego modelu płynięcia materiałów porowatych oparto na wynikach badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla spieków o gęstości nominalnej 0,8 i 0,9 wykonanych z mieszanki oznaczonej numerem 08 (tablica 3.1). Podstawowym założeniem programu badań był taki dobór parametrów, aby uzyskać materiał o wysokiej gęstości nominalnej, równomiernie zagęszczony w objętości. Próby kształtowania prowadzono do momentu utraty spójności dla wariantu odkształcenia ze swobodnym poszerzeniem bocznym, następnie gniot maksymalny dzielono na cztery gnioty jednostkowe. Szczegółowe wartości gniotów dla poszczególnych sposobów kształtowania zestawiono w tablicy 4.1. W badaniach tych przyjęto zasadę stosowania trzech próbek na jeden punkt, co zakładając symetrię procesu daje sześć powtórzeń dla jednego punktu pomiarowego. Na rys. 4.6 przedstawiono schemat prowadzenia prób.

Taki sposób prowadzenia badań był narzucony metodyką oceny rozmieszczenia porowatości. Otrzymane mapy porowatości wprowadzono do pamięci komputera traktując je jako dane do analizy płynięcia, jak również jako bazę danych do weryfikacji statystycznej wyników modelowych.

Uzyskane wyniki badań zmian rozkładu porowatości podczas odkształcenia plastycznego wskazują na jednoznaczny wpływ sposobu kształtowania na porowatość szczątkową i jej rozmieszczenie w odkuwce.

Z porównania przedstawionych na rysunkach od 4.7 a), b), c) do 4.12 a), b), c) wybranych rozkładów porowatości wynika, że najwyższy przyrost gęstości przy minimalnym gradiencie na przekroju osiągnięto przy kształtowaniu z częściowo ograniczonym płynięciem promieniowym. W procesach tych w całej objętości kształtowanego materiału aktywowane jest płynięcie plastyczne połączone z trójosiowym ściskaniem w końcowej fazie procesu. Płynięcie plastyczne prowadzi do znacznego zmniejszenia ilości i powierzchni nieciągłości wewnętrznych. Efekt ten zwiększa się jeszcze w wyniku końcowego oddziaływania ścianek matrycy na powierzchnie swobodne, powodującego w końcowej fazie procesu zamknięcie nieciągłości w warstwach podpowierzchniowych.



Rys. 4.6. Schemat prowadzenia prób kształtowania. Fig. 4.6. Scheme of the forming trials procedure.

W procesach kształtowania ze swobodnym płynięciem promieniowym występuje wprawdzie w kształtowanym materiale wzrost gęstości spowodowany płynięciem plastycznym, ale ze względu na istnienie stref o zróżnicowanym stopniu odkształcenia powstaje znaczny gradient porowatości szczątkowej. Swobodne płynięcie promieniowe powoduje wystąpienie nadmiernych naprężeń rozciągających na powierzchniach swobodnych i po przekroczeniu odkształceń granicznych prowadzi do lokalnej utraty spójności.

Najmniejsze efekty wzrostu gęstości wywołane odkształceniem plastycznym uzyskano przy kształtowaniu bez poszerzenia. Należy to tłumaczyć brakiem warunków do płynięcia plastycznego, co w połączeniu z tarciem wewnętrznym i tarciem o ścianki matrycy pomimo znacznego wzrostu nacisku prowadzi do minimalnej redukcji porowatości wewnętrznej. Podobny charakter przebiegu procesu odkształcenia obserwowano w procesie wgłębiania oraz wyciskania współbieżnego.

Nie bez wpływu na przebieg płynięcia plastycznego jest również początkowe zróżnicowanie porowatości przedkuwki będące efektem procesu zagęszczania i spiekania proszku, szczególnie w początkowej fazie odkształcenia plastycznego, gdy w objętości

## Wielkości odkształceń stosowane w badaniach eksperymentalnych

Gęstość	Sposób kształtowanis		Odkształcenie $\varphi_{z}$				
spieku			1	2	3	4	
	Speczanie						
. 21	swobodne		0,10	0,20	0,30	0,6	
	z ograniczonym	( 0,81	0,10	0,20	0,30	0,60	
1.		0,89	0,10	0,20	0,30	0,60	
Sec. 2	płynięciem W <sub>pb</sub>	0,95	0,10	0,20	0,30	0,6	
v=0.8		1,00	0,10	0,20	0,30	0,6	
o 0,0	Wyciskanie	współbieżne	i przeciv	vlnezae		-	
1524	swobodne		0,13	0,22	0,28	0,4	
		0,81	0,13	0,22	0,28	0,4	
	z ograniczonym	0,89	0,13	0,22	0,28	0,4	
1.1	płynięciem $W_{pb} = {}^{t}$	0,95	0,13	0,22	0,28	0,4	
		1,00	0,13	0,22	0,28	0,4	
	Spęczanie						
	swobodne		0,14	0,25	0,40	0,63	
	z ograniczonym płynięciem $W_{pb}$ =	0,81	0,14	0,25	0,40	0,6	
		0,89	0,14	0,25	0,40	0,63	
		0,95	0,14	0,25	0,40	0,63	
9-09		1,00	0,14	0,25	0,40	0,62	
0=0,9	Wyciskanie współbieżne i przeciwbieżne						
	swobodne		0,13	0,22	0,28	0,42	
		0,81	0,13	0,22	0,28	0,42	
	z ograniczonym płynięciem $W_{pb}$ =	0,89	0,13	0,22	0,28	0,42	
		0,95	0,13	0,22	0,28	0,42	
		1 00	0.12	0.22	0.29	0.42	

powstają strefy przejścia w stan plastyczny. O rozkładzie tych stref decyduje współdziałanie:

- lokalnego schematu stanu naprężeń,
- Iokalizacji obszarów o podwyższonej pcrowatości.

Nałożenie się strefy uprzywilejowanego płynięcia na strefę o podwyższonej porowatości może doprowadzić przy niekorzystnym schemacie stanu naprężeń do lokalizacji odkształcenia, a tym samym do lokalnej utraty spójności. Strefy o podwyższonej, w stosunku do otoczenia, gęstości zachowują się z kolei jak obszary twardej fazy podczas kształtowania materiałów litych. Wynika to ze zróżnicowanej w zależności od porowatości wartości naprężenia uplastyczniającego.

W procesie wyciskania współbieżnego i przeciwbieżnego na powierzchniach swobodnych (rysunki od 4.9 a), b), c) do 4.12 a), b), c)) występował wzrost porowatości wywołany pojawieniem się naprężeń rozciągających ( $J_1 > 0$ ). Prowadziło to do lokalnego zróżnicowania porowatości i w efekcie przy odkształceniach przekraczających graniczne do lokalnej utraty spójności. Przy projektowaniu procesów kształtowania plastycznego materiałów porowatych niezbędne jest przeprowadzenie analizy odkształceń lokalnych w aspekcie wykorzystania zapasu plastyczności.

Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętego w pracy mechanizmu odkształcenia materiałów porowatych (rys. 4.13). W modelu tym powstające podczas płyniecia plastycznego naprężenia ścinające powodują zbliżenie się ścianek i pojawienie się tzw. mostków kontaktowych pomiędzy ściankami nieciągłości. Występuje tutaj również, ze względu na odkształcenie postaciowe zjawisko ślizgania się po sobie ścianek defektu z prędkością V, w rezultacie czego występy zachodzą na siebie zwiększając efekt spojenia. Zewnętrzne ciśnienie p nie pozwala na rozrost nieciągłości i stwarza możliwość powstawania dużej ilości mostków kontaktowych między przeciwległymi ściankami nieciągłości. W wyniku odkształcenia plastycznego i wydzielenia energii powierzchniowej w punktach styku powstaje lokalny nagrzew materiału sprzyjający aktywacji procesów dyfuzyjnych. W materiałach polikrystalicznych mostki kontaktowe tworzą się nie tylko przy spotkaniu istniejących występów, ale również w wyniku wślizgiwania się we wnękę nieciągłości bloków poślizgowych z ziarn przylegających do powierzchni defektu. W rezultacie liczba mostków kontaktowych i ich powierzchnia w procesie odkształcenia znacznie się powiększa, tak że nieciągłość dzieli się na wiele oddzielnych małych nieciągłości, które przy dalszym odkształceniu łączą się w wyniku omówionego wyżej mechanizmu. Płynięcie plastyczne spieku prowadzi więc nie tylko (przez kolejne podziały nieciagłości) do pełnego ich zamknięcia, ale również do ich spojenia odkształceniowego.

Przyjęty model fizyczny mechanizmu wzrostu gęstości przy odkształceniu plastycznym materiałów porowatych potwierdziły również obserwacje zmian strukturalnych (rysunki 4.9 do 4.12). Wraz ze wzrostem odkształcenia zmieniają się, w wyniku działania naprężeń ścinających, wymiary nieciągłości. Zwiększają się wymiary równoległe do kierunku płynięcia, natomiast wymiary w kierunkach prostopadłych ulegają redukcji. Wraz ze wzrostem odkształcenia następuje zbliżenie



Rys. 4.7 a. Zmiana gęstości podczas spęczania swobodnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.8$ .

Rys. 4.7 a. Change in density in the course of free upset forging for the material with the initial density  $\vartheta = 0.8$ .



Rys. 4.7 b. Zmiana gęstości podczas spęczania z ograniczonym poszerzeniem  $(W_{pp}=0,89)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta=0,8$ .

Rys. 4.7 b. Change in density in the course of upset forging with restricted widening  $(W_{pe}=0,89)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0,8$ .









Odkształcenie









Rys. 4.7 c. Zmiana gęstości podczas spęczania bez poszerzenia ( $W_{pb} = 1,00$ ) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0,8$ .

Rys. 4.7 c. Change in density in the course of upset forging without widening  $(W_{\mu\nu} = 1.00)$  for the material with the initial density  $\vartheta = 0.8$ .



Rys. 4.8 a. Zmiana gęstości podczas spęczania swobodnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ .

Rys. 4.8 a. Change in density in the course of free upset forging for the material with the initial density  $\vartheta = 0.9$ .



Rys. 4.8 b. Zmiana gęstości podczas spęczania z ograniczonym poszerzeniem  $(W_{\omega} = 0.89)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ .

Rys. 4.8 b. Change in density in the course of upset forging with restricted widening  $(W_{ab}=0,89)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0,9$ ,



- Ays. 4.8 c. Zmiana gęstości podczas spęczania bez poszerzenia ( $W_{pb} = 1,00$ ) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0,9$ .
- Rys. 4.8 c. Change in density in the course of upset forging without widening  $(W_{\mu\nu}=1,00)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0.9$ .



- Rys. 4.9 a. Zmiana gęstości podczas swobodnego wyciskania przeciwbieżnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0, 8$ .
- Rys. 4.9 a. Change in density in the course of free backward extrusion for the material with the initial density  $\vartheta = 0.8$ .



Rys. 4.9 b. Zmiana gęstości podczas wyciskania przeciwbieżnego z ograniczonym poszerzeniem ( $W_{pb}$ =0,89) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta$ =0,8. Rys. 4.9 b. Change in density in the course of backward extrusion with restricted widening ( $W_{pb}$ =0,89) for the material with the initial density  $\vartheta$ =0,8.



Rys. 4.9 c. Zmiana gęstości podczas wyciskania przeciwbieżnego bez poszerzenia  $(W_{\mu\nu} = 1,00)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0,8$ .

Rys. 4.9 c. Change in density in the course of backward extrusion without widening  $(W_{ab} = 1,00)$  for the material with the initial density  $\vartheta = 0,8$ .



Rys. 4.10 a. Zmiana gęstości podczas swobodnego wyciskania przeciwbieżnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ .

Rys. 4.10 a. Change in density in the course of free backward extrusion for the material with the initial density  $\vartheta = 0.9$ .

91



Rys. 4.10 b. Zmiana gęstości podczas wyciskania przeciwbieżnego z ograniczonym poszerzeniem ( $W_{\mu\nu} = 0.89$ ) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ .

Rys. 4.10 b. Change in density in the course of backward extrusion with restricted widening  $(W_{\mu\nu} = 0.89)$  for the material with the initial density  $\vartheta = 0.9$ .



Rys. 4.10 c. Zmiana gęstości podczas wyciskania przeciwbieżnego bez poszerzenia  $(W_{ab}=1,00)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta=0.9$ .

Rys. 4.10 c. Change in density in the course of backward extrusion without widenig  $(W_{\mu\nu}=1,00)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0.9$ .









Odkształcenie





Rys. 4.11 a. Zmiana gęstości podczas swobodnego wyciskania współbieżnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.8$ .

Rys. 4.11 a. Change in density in the course of free forward extrusion for the material with the initial density  $\vartheta = 0.8$ .



Rys. 4.11 b. Zmiana gęstości podczas wyciskania współbieżnego z ograniczonym poszerzeniem ( $W_{pb} = 0.89$ ) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.8$ . Rys. 4.11 b. Change in density in the course of forward extrusion with restricted widening ( $W_{pb} = 0.89$ ) for the material with the initial density  $\vartheta = 0.8$ .



Rys. 4.11 c. Zmiana gęstości podczas wyciskania współbieżnego bez poszerzenia  $(W_{\mu\nu}=1,00)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta=0,8$ .

Rys. 4.11 c. Change in density in the course of forward extrusion without widening  $(W_{\mu\nu}=1,00)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0.8$ .



Rys. 4.12 a. Zmiana gęstości podczas swobodnego wyciskania współbieżnego materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ .

Rys. 4.12 a. Chanfe in density in the course of free forward extrusion for the material with the initial density  $\vartheta = 0.9$ .



Rys. 4.12 b. Zmiana gęstości podczas wyciskania współbieżnego z ograniczonym poszerzeniem ( $W_{pb} = 0.89$ ) materiału o gęstości początkowej  $\vartheta = 0.9$ . Rys. 4.12 b. Change in density in the course of forward extrusion with restricted widening ( $W_{pb} = 0.89$ ) for the material with the initial density  $\vartheta = 0.9$ .



Rys. 4.12 c. Zmiana gęstości podczas wyciskania współbieżnego bez poszerzenia  $(W_{pb}=1,00)$  materiału o gęstości początkowej  $\vartheta=0,9$ .

Rys. 4.12 c. Change in density in the course of forward extrusion without widening  $(W_{pb}=1,00)$  for the material with the initial density  $\vartheta=0.9$ .





ścianek i nieciągłości ulegają podziałowi (rys. 4.13) na mniejsze, które następnie ulegają spojeniu odkształceniowemu. Występujący w końcowej fazie procesu wzrost nacisku, będący efektem zamknięcia objętości wykroju, zmniejsza porowatość w warstwach leżących pod powierzchniami swobodnymi. Tak więc reasumując, uzyskanie w odkształcanym materiale porowatym wysokiej gęstości przy minimalnym jej zróżnicowaniu zależy od spełnienia następujących warunków:

- geometria spieku w stosunku do geometrii wykroju powinna umożliwiać płynięcie plastyczne w objętości materiału,
- odkształcenia lokalne nie mogą przekraczać wartości granicznych,
- w końcowej fazie procesu kształtowania należy stworzyć warunki do odkształceń objętościowych w warunkach trójosiowego ściskania (kształtowanie w zamkniętej matrycy).

### 4.3. Symulacja komputerowa procesów płynięcia materiałów porowatych

Opracowany w niniejszej pracy program komputerowej symulacji płynięcia materiałów porowatych umożliwił ocenę charakteru zageszczania spieków o zróżnicowanej gęstości wstępnej. Symulację przeprowadzono dla schematów kształtowania objętych programem badań eksperymentalnych. W pracy zastosowano rozwiązanie analityczno-empiryczne (początkowe rozkłady gęstości określono w sposób doświadczalny). W przyjętej metodyce badań eksperymentalnych analizę płynięcia plastycznego prowadzono z uwzględnieniem zmiany porowatości na przekroju odkształcanego materiału, stąd też w opracowanym algorytmie obliczeń jako zbiór wyników generowano między innymi mapę porowatości na przekroju. Umożliwia to, poprzez porównanie map porowatości otrzymanych z obliczeń z wynikami eksperymentu, statystyczną ocenę jakości przyjętych rozwiązań. Dla porównania statystycznego map porowatości otrzymanych na podstawie obliczeń symulujących z wynikami doświadczeń przygotowano bazy wyników (podprogram translac) w sposób przedstawiony na rys. 4.6. Umożliwia to dokładne odzwierciedlenie w programie symulacyjnym warunków prowadzenia eksperymentu (dla każdego gniotu jednostkowego przyjmowana jest próbka o innym rozkładzie wstępnym).





Rys. 4.14. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu.
Rys. 4.14. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.



Spęczanie Gestość nominalna = 0.9

Rys. 4.15. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu.

Rys. 4.15. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.



Rys. 4.16. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu.
Rys. 4.16. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.

#### Wyciskanie przeciwbieżne Gęstość nominalna = 0.9



Rys. 4.17. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu.
Rys. 4.17. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.



Rys. 4.18. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu. Rys. 4.18. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.





Rys. 4.19. Stopień dopasowania wyników symulacji do eksperymentu.
Rys. 4.19. Comparison of the experimental results to these obtained from the computer simulation.

# 4.4. Ocena statystyczna zgodności wyników badań symulacyjnych z wynikami eksperymentu

Przeprowadzona (według omówionej w rozdziale 3.3.3 metodyki) analiza statystyczna wykazała wysoką zgodność rozkładów porowatości uzyskanych z obliczeń symulacyjnyci z wynikami badań eksperymentalnych. Wyniki oceny stopnia dopasowania wyników dla schematów objętych programem badań przedstawiono na rysunkach od 4.14 do 4.19. Za wynik pozytywny przyjęto wynik wyższy od wartości wskaźnika teoretycznego. Wskaźnik ten dla założeń przyjętych w pracy (p=0.95, sześć powtórzeń na jedno pole obserwacyjne) wynosił 68,3%.

Analizując szczegółowo otrzymane wyniki można zauważyć, że najlepsze przybliżenia wyników badań symulacyjnych z wynikami eksperymentu osiągnięto dla większych odkształceń, szczególnie w procesach płynięcia z ograniczonym poszerzeniem bocznym. Świadczy to o wpływie tzw. czynnika probabilistycznego na stopień dopasowania wyników. Im mniejsza porowatość, czyli im bardziej materiał zbliża się do materiału litego, tym mniejsze zróżnicowanie gęstości pomiędzy poszczególnymi strefami odkuwki, jak również pomiędzy powtórzeniami prób i tym dokładniejszy opis charakteru płynięcia materiału porowatego. Porównując pomiędzy sobą wyniki stopnia dopasowania dla poszczególnych schematów odkształcenia nie zauważono istotnego wpływu tego czynnika na wyniki testu statystycznego. Świadczy to o dobrym przybliżeniu modelu do warunków panujących w realnych procesach kształtowania materiałów porowatych. Mniejszy stopień przybliżenia wyników obliczeń do wyników eksperymentu przy małych wartościach odkształcenia świadczy o zróżnicowanym charakterze płynięcia w materiałe o wyższej porowatości i trudnym do uwzględnienia udziale zagęszczenia osnowy w początkowej fazie odkształcenia.

Generalnie zauważyć można we wszystkich przypadkach, że niezależnie od sposobu obciążenia wraz ze wzrostem odkształcenia rośnie stopień dopasowania rozkładu porowatości otrzymanego z obliczeń z rozkładem rzeczywistym. Jest to spowodowane zmniejszeniem porowatości i wyższej w związku z tym zgodności warunku plastyczności z rzeczywistym przebiegiem procesu.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Otrzymane wyniki eksperymentalne potwierdziły przyjętą tezę i świadczą o decydującym wpływie płynięcia plastycznego na gęstość i tym samym własności odkuwek ze spieków kształtowanych na zimno. Wysoką gęstość otrzymano tylko w tych przypadkach, kiedy w odkuwce istniały warunki do lokalnych odkształceń plastycznych. Przyjęta w procesie kształtowania plastycznego materiałów porowatych wielkość odkształcenia powinna być poprzedzona analizą odkształceń lokalnych w aspekcie wykorzystania zapasu plastyczności,

Przeprowadzone przemysłowe próby zastosowania wyrobów wytwarzanych według opracowanych w pracy zasad kształtowania na zimno materiałów porowatych [58; 61; 63; 65] potwierdziły szerokie możliwości technologiczne tej techniki wytwarzania. Połączenie procesów kształtowania plastycznego na zimno z zabiegami obróbki cieplno-chemicznej pozwala rozszerzyć stosowanie tej technologii do wytwarzania wyrobów, od których wymagana jest wysoka odporność dynamiczna warstwy wierzchniej.

Opracowana w niniejszej rozprawie metodyka symulacji komputerowej procesu kształtowania plastycznego na zimno materiałów porowatych może stanowić punkt wyjściowy do opracowania profesjonalnego programu wspomagania komputerowego projektowania technologii związanych z wytwarzaniem odkuwek osiowo-symetrycznych z materiałów porowatych. W programie tym może również znaleźć zastosowanie zebrana w pracy baza danych eksperymentalnych obejmująca różne schematy kształtowania osiowo-symetrycznego, jak również własności mieszanek z proszków na osnowie żelaza. Do najwaźniejszych wniosków należą:

- 1. Opracowany w pracy program symulacyjny pozwala z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością prognozować płynięcie materiałów porowatych (na osnowie proszku żelaza) przy kształtowaniu osiowo-symetrycznym.
- 2. Wysokie zagęszczenie w objętości odkuwki (bez lokalnej utraty spójności) zależy od spełnienia następujących warunków:
  - geometria spieku w stosunku do geometrii wykroju powinna zapewniać płynięcie plastyczne w objętości materiału,
  - odkształcenia lokalne nie mogą przekraczać wartości granicznych,
  - w końcowej fazie kształtowania należy stworzyć w odkuwce trójosiowy stan naprężeń ściskających, co poprawia efekt zamknięcia nieciągłości w warstwach przypowierzchniowych.

- Potwierdzeniem niedoskonałości stosowanych dotychczas technologii kształtowania materiałów porowatych są wyniki zagęszczania spieku bez udziału odkształceń plastycznych. Procesy te mimo znacznego wzrostu nacisków jednostkowych nie prowadzą do pełnego zagęszczenia materiału.
- 4. Opracowane w pracy metody oceny własności materiałów porowatych, a w szczególności zastosowanie do wyznaczenia rozkładu porowatości metod metalografii ilościowej pozwoliło na precyzyjną i efektywną ocenę wpływu odkształcenia plastycznego na przebieg lokalnych procesów zagęszczania i spajania odkształceniowego w objętości materiału porowatego.

Istnieje potrzeba dalszych prac doskonalących opis matematyczny procesu, szczególnie niezbędne są modele zjawisk zachodzących podczas kształtowania plastycznego na zimno w strukturze materiału porowatego. Opracowanie precyzyjnych metod opisu zmian własności materiału porowatego podczas odkształcenia plastycznego na zimno stwarza warunki do dalszego doskonalenia programów symulacyjnych, które są podstawą do budowy profesjonalnych programów wspomagania komputerowego.

## 6. LITERATURA

[1]	Alkatib H. S.: Proc. 21 Int. Mach. Tool Des. and Res. Conf. Swansea 1980.
[2]	Baliński L., Czarniawski M.: "Mechanik" 1978, nr 10.
[3]	Baran J., Pregowski J.: Materiały z VI Konferencji Metalurgii Proszków Wrocław 1984, 160.
[4]	Baran J., Pregowski J.: Materiały z VII Konferencji Metalurgii Proszków, Kraków 1988, 741.
[5]	Barkow L., i inni: "Kuznieczno-sztampowocznoje proizwodstwo", 1990, nr 11.
[6]	Bathe K. J.: Analysis Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey 1982.
[7]	Bathe-Kriycler: "Response Comp. Struc." 1981, nr 12.
[8]	Bockstiegel G.: "Industrie Anzeuger" 1977, nr 86.
[9]	Bockstiegel G.: "Powder Metallurgy International" 1986, nr 2.
[10]	Bondariew A. A. i inni: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1985, nr 1.
[11]	Burany J.: Gepgyartastechnologia, 1983, nr 9.
[12]	Corapcioglu Y.: "Powder Technol." 1978, nr 2.
[13]	Crawford J. E.: "Sandvik Research Report" 1983, nr 11.
[14]	Cull G. W.: "Metallurgia and Metal Forming" 1972, nr 4.
[15]	Czicziniew N., Kubin A., Poluchin P.: Mietody issledowania procesow płasticzeskowo deformirowania. Izd. Metałłurgia, Moskwa 1977.
[16]	J. Cwajna: Ilościowy opis struktury stopów narzędziowych i jego zastosowanie, Rozpr. hab. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Hutnictwo nr 39, Gliwice 1991.
[17]	Dorofiew G., Mirosznikow W.: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1979, nr 8.
[18]	Druanow W. A.: Prikładnaja tieoria płasticznosti poristych tieł, Moskwa 1989.
[19]	Development of Sintered Components for Japanese Automotive "Metall Powder Report" 1986, nr 1.
[20]	Elmqvist H., Astrom K.: User's Guide for MS-DOS Computers, Departament of Automatic Control, Lund Institute of Technology 1986.
[21]	Findeisen W.: Analiza systemowa - Podstawy i metodologia, PWN, Warszawa 1985.
[22]	Grabczak A. K. i inni: Materiały VI Konferencji Metalurgii Proszków, Wrocław 1984.

110	
[23]	Green R. I.: Plasticity theory for porous solids "Int. Journ. Mech. Sci." 1972
[24]	Grinn R.: "Mechanika" 1973, nr 4.
[25]	Grosman F., Lukowski J.: "Tvarnenie vysokymi parametrami-nekonvencne technologie tvarnenia", Bratysława 1985.
[26]	Grosman F., Łukowski J.: Model i opis matematyczny procesu zagęszczania proszków w warunkach oddziaływania dużych ciśnień i odkształceń. Mat. z VI Konf. Metalurgii Proszków, Wrocław, 1984.
[27]	Grosman F, Łukowski J.: Wpływ odkształcenia i naprężeń na przebieg procesów zamykania i spajania wad wewnętrznych. "Zeszty Naukowe A G H seria Mechanika" 1986, nr 9.
[28]	Grosman F, Łukowski J.: Patent nr 190080 - Sposób wytwarzania pierścieni i tulei z proszków metali.
[29]	Grosman F., J. Cwajna i inni: Korelacja między odkształceniem, strukturą i własnościami dla stali narzędziowej przerobionej plastycznie w kowarkach. Sprawozdania z pracy badawczej nr CPBP 02.07. zad.5.6.1. 1986 -1990
[30]	Grosman F., Łukowski J.: "Mechanik" 1977, nr 4.
[31]	Grosman F., Łukowski J.: Kształtowanie plastyczne wyrobów z proszków metali. Sprawozdania z prac badawczych wykonanych w ramach Problemu węzłowego, MR-J-21.
[32]	Gun G. A., Gutkow W. N.: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1986, nr 5.
[33]	Gutmans E. Y., Rabinkin A.: "Scripta Metallurgica", 1979, Vol. 13, Pergamon Press, USA.
[34]	Hammerschmidt P.: Zalety metody wytwarzania spieków kutych. Referat firmy "MIBA Sintermetall AG" przedstawiony w ramach Tygodnia Techniki Austriackiej w Polsce, listopad 1979.
[35]	Hehenberger M., Samuelson P.: Proc. IUTAM Conference of Deformation and Failure of Granular Materials, Rotterdam 1982.
[36]	Hibbit H. D., Marcal P. V.: "Int. J. Solids Structures" 1970, nr 6.
[37]	Hill R.: Recent Progress in Applied Mechanics, Stockholm 1967.
[38]	Kaczanow L. M.: Osnowy tieorii płasticznosti, Kiev 1969.
[39]	Katalog firmy Schmid - Szwajcaria.
[40]	Karpiński T., Kęsy B., Ogrodnik J.: "Metaloznawstwo i Obróbka Cieplna" 1976, nr 19.
[41]	Koenig W.; Roeber G.: "Metal Powder Report" 1990, nr 4.
[42]	Kopp R., Myong-Lae Cho, Moraes de Souza; "Steel research" 1988, nr 4.
[43]	Krieg R. D., Krieg D. B.: "Journal Pressure Vessel Technology Trans." ASME Paper 77-PVP-1 1978, nr 11.
[44]	Kuhn H., Downey C. L.: "Int. J. Powder Met." 1976, nr 1
- [45] Leheup E. R. Moon J. R.: "Metall Powder Report" 1983, nr 3.
- [46] Leśniak J.: "Przegląd Mechaniczny" 1981, nr 4.
- [47] Lindskog P.: Sandvik Laboratory Report 1983.
- [48] Lisowski J.: "Mechanik" 1975, nr 2.
- [49] Li owski J., Olszewski M.: "Obróbka plastyczna" 1984, nr 3.
- [50] Lisowski J., Olszewski M.: "Przegląd Mechaniczny" 1987, nr 16.
- [51] Lukowski J.: Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1980.
- [52] Łukowski J., Grosman F., Gierek A.: "Inżynieria Materiałowa", 1982, nr 2.
- [53] Łukowski J., Grosman F.: Materiały z Międzynarodowego Sympozjum "Obrabotka wysokimi paramietrami davlenia", Bratysława 1985.
- [54] Łukowski J. i inni: Dobór gatunków materiałów oraz technologii ich wykonania przeznaczonych na narzędzia do kształtowania obwiedniowego. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-396/RM-2/83.
- [55] Łukowski J. i inni: Dobór gatunków oraz technologii wykonania materiałów narzędziowych na narzędzia do kształtowania obwiedniowego. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-294/RM-2/84.
- [56] Łukowski J., Grosman F.: Badania własności spieków żelaza przeznaczonych na części maszyn o wysokiej wytrzymałości. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-274/RM-2/84.
- [57] Łukowski J., Grosman F.: Ustalenie kryteriów doboru materiałów na narzędzia do dogeszczania i kształtowania obwiedniowego. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-287/RM-2/85.
- [58] Łukowski J., Grosman F.: Opracowanie technologii kształtowania odkuwek ze spieków (wdrożenie w EMA Celma) Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-592/RM-2/86.
- [59] Łukowski J., Grosman F.: Określenie zjawisk fizykochemicznych i strukturalnych determinujących własności spieków na narzędzia do obróbki plastycznej i elementy maszyn. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-738/RM-2/86 CPBR 2.4.
- [60] Łukowski J., Grosman F.: Opracowanie wniosków i zalożeń dla technologów i konstruktorów dotyczących nierównomierności odkształceń w procesach dogęszczania spieków. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-184/RM-2/87.
- [61] Łukowski J., Grosman F.: Umowa o dokonanie i realizację projektu wynalazczego p.t. Opracowanie technologii wytwarzania nożyków do maszynek do mielenia mięsa, EMA Blachownia. Sprawozdanie do umowy nr U/3/88.
- [62] Łukowski J.: Wpływ odkształcenia plastycznego na zmianę porowa- tości odkuwek ze spieków. Konferencja Sekcji Teorii Procesów Przeróbki Plastycznej PAN, Wisła 1990.

112	
[63]	Łukowski J. Grosman F.: Proszki stopowe na osnowie żelaza do wytwarzania części o podwyższonych własnościach mechanicznych. Sprawozdanie z pracy badawczej nr U-75/RM-2/82.
[64]	Łukowski J.: Badania własności fizykochemicznych spieków i próby eksploatacyjne. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-264/RM-2/85.
[65]	Lukowski J.: Opracowanie metody otrzymywania spieku tytanowego dla potrzeb aktywowanych elektrod stałowymiarowych. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-304/RM-2/85.
[66]	Łukowski J.: Proszki stopowe na osnowie żelaza do wytwarzania części o podwyższonych własnościach mechanicznych. Sprawozdanie z pracy badawczej nr U-82/RM-2/83.
[67]	Lukowski J.: Analiza parametrów procesu kształtowanie na gorąco pod kątem konstrukcji narzędzi. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-163/RM-2/89.
[68]	Łukowski J.: Opracowanie technologii kształtowania na zimno wytypowanych spieków na na osnowie żelaza. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-164/RM-2/89.
[69]	Łukowski J.: Opracowanie i wdrożenie technologii wysokowytrzyma-łych elementów elektronarzędzi metodą metalurgii proszków. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-354/RM-2/86.
[70]	Łukowski J.: Badania wpływu stanu naprężeń na płynięcie i graniczne odkształcenia materiałów spiekanych na osnowie proszków żelaza. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-500/RM-2/86.
[71]	Łukowski J.: Kryteria doboru materiałów na narzędzia przeznaczone do przeróbki plastycznej spieków oraz opracowanie koncepcji stanowiska do kucia. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-185/RM-2/87.
[72]	Łukowski J.: Nowoczesne materiały wysokotemperaturowe oraz określanie podstaw wytwarzania kompozytów. Sprawozdanie z pracy badawczej nr MR-J-22/1981.
[73]	Lukowski .J: Opracowanie technologii kucia na gorąco spiekanych przygotówek stalowych. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-113/RM-2/90.
[74]	Łukowski J.: Technologia wytwarzania odkuwek ze spieków o podwyższonej odporności na ścieranie kształtowanych na zimno. Sprawozdanie z pracy badawczej nr NB-114/RM-2/90.
[75]	Mattiasson K.: PhD. Thesis Chalmers University of Technology Departament of Structural Mechanics Publ. 83, 1983 nr 1.
[76]	Mc Meeking R., Rice J. R.: "Int. J. Solids Structures" 1975, nr 11.
[77]	Mori K., Shima S.: Finite element method "Bulletin JSME" 1980, nr 178.
[78]	Musichin A. M.: "Poroszkowaja Mietałlurgia" 1979, nr 1.

[79]	Nachtegaal K., De Jong J. E.; Int. J. Num. Meth. Eng. 1981, nr 17.
[80]	Niessen J.: "Powder Metalurgy Conf. Proc." Detroit 1971.
[81]	Nowacki W. K.: Zagadnienia falowe w teorii plastyczności, Warszawa 1974.
[82]	Okoński S. Teoretyczne podstawy procesów plastycznego kształtowania spieków. Sprawozdanie z pracy badawczej nr 01-02-05. Politechnika Krakowska 1987.
[83]	Osakada K., Shima S.: "International Pulvermetall Tagung DDR, Dresden 1977.
[84]	Oyane M., Shima S.: "Bulletin of the ISME" 1973, nr 99.
[85]	Oyane M., Kawakami T.: "Japan Society of Powder and Powder Metallurgy" 1973, nr 5.
[86]	Oyane M., Tabata T.: "J. Japan Soc. Tech. Plasticity 1974, nr 43.
[87]	Park J. J., Kobayashi S.: "Int. J. Mech. Sci." 1984, nr 3.
[88]	Petrosjan G. L. i inni: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1984, nr 1.
[89]	Petrosjan G. L.: "Izwiestia VUZOV Ser. Maszynostrojenije" 1983, nr 5.
[90]	Petrosjan G. Ł. i inni: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1982, nr 5.
[91]	Petrosjan G. L.: "Dokłady AN Arm.SSR" 1977, nr 3.
[92]	Petrosjan G. L.: Plasticzeskoje deformirowanie poroszkowyh matieriałow Mietałlurgia, 1988.
[93]	Petrosjan G. Ł., Nersisjan G. G., Awitian C.: "Izwiestia AN Arm. SSR", "Miechanika" 1980, nr 1.
[94]	Pietrzyk M.: "Hutnik" 1982, nr 49.
[95]	Pietrzyk M., Głowacki M.: "Hutnik" 1985, nr 52.
[96]	Polska norma - PN-71/H-97033.
[97]	Poluchin P. J. i inni: "Deformacja i naprażenia pri obrabotkie mietałłow dawleniem" Moskwa 1981.
[98]	Pregowski J., Baran J.: "Materiały z VI Konferencji Metalurgii Proszków" Wrocław 1984, str. 147.
[99]	Pregowski J., Baran J.: "Materiały z VII Konferencji Metalurgii Proszków" Kraków 1988, str. 583.

- [100] Pregowski J.: "European P/M Conference and Exhibition" Dtsseldorf 1986.
- [101] Radomyselski J. D. i inni: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1981, nr 3.
- [102] Ramakrishnan N., i inni: "Acta Metall." 1984, nr 3.
- [103] Reichman S. H.: Int. J. Powder Met. and Powder Techn. 1978, nr 4.
- [104] Ridal K. A., Cunchill R. T.: "Metallurgia and Metal Forming" 1971, nr 8.
- [105] Roll K., Tekkaya E.: "Blech Rohre Profile"1985, nr 6.
- [106] Roman O. W., Zwonariew E.: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1980, nr 10.

114	
[107]	Sadok L., Pietrzyk M., Packo M.: Archives of Metalurgy . 1989 2.1
[108]	Sadok L., Packo M.: "Steel Research" 1989, nr 8.
[109]	Sandler I. S., Di Maggio F. L.: "J. Geotech. Eng. Division ASCE" 1976, vol. 102.
[110]	Schachner H. D.: Industrie Anzeuger, 1977, nr 7.
[111]	Shima S., Yamada M.: "Pre-print Spring Conf. Powder and Powder Metall. 1980, nr 24.
[112]	Serdiuk G. G., Michailov O. B.: Poroszkowaja Mietałłurgia 1986 nr 4.
[113]	Siegał W. M. i inni: "Poroshkovaja Mietallurgia" 1982, nr 9.
[114]	Simdstrom B. O., Fishmeister H. F.: "Powder Met." 1973, nr 4.
[115]	Skorohod W., Tuczinskij L.: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1978, nr 11.
[116]	Smirnow-Alajew G. A.: Soprotiwlenie materialow płasticzeskomu deformirowaniu, Maszynostrojenie, Leningrad 1978.
[117]	Szczepanik S.: "Hutnik" 1990, nr 7.
[118]	Sztern M. i inni: Fenomenologiczeskije teorii pressowania poroszkow Naukowa Dumka, Kiew 1982.
[119]	Tarnowski W., i inni: Komputerowe wspomaganie projektowania, Skrypt Wyższej Szkoły Inżynierskiej Koszalin 1991
[120]	Tuczinskij Ł. I.: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1975, nr 4.
[121]	Vogel J. H., Lee D.: "Journal of The Minerals, Metals & Materials Society" 1990, nr 2.
[122]	Weber M. et al: Truck Synchronizer Ri Produced by Powder Forging. SAE Technik Paper Series 860153, 1986
[123]	Wolkogon G. M. i inni: "Poroszkowaja Mietałłurgia" 1984, nr 47.
[124]	Yamada Y., Yoshimura N.: "Int. J. Mech. Sci." 1978, nr 10.
[125]	Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy procesu ciągnienia pełnych profili okrągłych CPBR-02. 08. Zadanie 4.2.2. Etap I-III, 1986/87/88, AGH Kraków.
[126]	Zienkiewicz O.: Mietod koniesznych elemientow w tiechnikie, Izdatielstwo Mir 1975.
[127]	Żdanowicz G. M.: Tieoria priessowania mietalliczeskich poroszkow, Mietałlurgia 1969.

# KSZTAŁTOWANIE PLASTYCZNE MATERIAŁÓW POROWATYCH

### Streszczenie

O własnościach wyrobów wytwarzanych metodami metalurgii proszków decyduje obok składu chemicznego gęstość, która warunkuje możliwy do osiągnięcia poziom własności użytkowych. Jedną z metod podwyższenia gęstości jest kształtowanie plastyczne spieku. Gęstość końcowa wyrobu zależy od stanu naprężeń i wielkości lokalnych odkształceń plastycznych nadanych w procesie przeróbki plastycznej. Ponieważ zarówno gęstość początkowa, jak i odkształcenie lokalne są nierównomierne w objętości kształtowanego spieku, należy również uwzględnić wpływ tego czynnika na gęstość końcową, zwracając uwagę na szczególnie niekorzystny wpływ stanu naprężeń  $(J_i > 0)$ , prowadzący do pojawienia się pęknięć w odkuwce. Uzyskanie pełnej informacji o rozmieszczeniu lokalnej porowatości, rozkładzie lokalnych odkształceń jest niezbędne do prawidłowego projektowania procesów kształtowania plastycznego materiałów porowatych.

W części literaturowej przedstawiono aspekty technologiczne kształtowania plastycznego spieków, jak również zaprezentowano podstawowe założenia teorii płynięcia plastycznego materiałów porowatych.

W zasadniczej części pracy dokonano analizy dotychczasowych poglądów dotyczących procesów kształtowania objętościowego na zimno metalicznych materiałów porowatych, opracowano model matematyczny płynięcia plastycznego oraz program symulujący plastyczne płynięcie odkuwek osiowo-symetrycznych. W pracy została również opracowana metodyka weryfikacji eksperymentalnej uzyskanych wyników. Do analizy płynięcia wykorzystano powszechnie stosowane w metalografii ilościowej parametry stereologiczne rozmieszczenia nieciągłości na powierzchni przekroju.

# PLASTIC FORMING OF POROUS MATERIALS

#### Summary

Besides the chemical composition, this is density which controls the attainable level of properties of the powder metallurgy products. Plastic forming of a sintered preform can be one of the methods to obtain higher density of the material. The final density of the product depends on the state of stress and the level of local plastic strain created in the course of plastic working. Because both initial density and local strains are being inhomogenously distributed in the sinters formed, this inhomogeneity should be also taken into consideration as a factor affecting the final density; attention should be paid to the particularly detrimental influence of the state of stress ( $J_1 > 0$ ) which may lead to the cracks in the forging. Complete information concerning both local porosity and local stress distribution is essential in a proper designing of the processes of porous material plastic forming.

In the part of the work reporting the literature studies the technological aspects of plastic forming of sintered products and some fundamental assumptions of the porous materials plastic flow theory have been presented.

The main part of the work the analysis of the up-to-date views concerning volume cold forming of metallic porous materials has been performed and a mathematic model of the plastic flow as well as a programme simulating the plastic flow of the axially-symmetric forgings have been worked out. A method for the experimental verification of the results obtained has been also developed. To the flow analysis the widely used stereological parameters of the surface distribution of the material discontinuities have been applied.

## SINTERSCHMIEDEN

### Kurzfassu g

Auf die Eigenschaften der nach dem Pulvermetallurgieverfahren hergestellten Materialen hat neben der chemischen Zusammenfassung auch die Dichte den entscheiden Einfluß. Eine der Methoden der Erhöhung der Dichte ist das Sinterschmieden. Die Enddichte des Erzeugnisses ist abhängig von der lokalen plastichen Deformation und von dem Spannungszustand, die durch die plastische Verformung hervorgerufen werden. Die Ausgangsdichte und die lokale Deformation sind inhomogen verteilt in dem gesinterten Material. Der Einfluss dieses Elements auf die Enddichte muß auch berücksichtigt werden. Besonders ungünstig ist der Einfluß des Spannungszustands ( $J_1 > 0$ ), der zu dem Bruch des Schniedestücks führt. Das Gewinnen der ausführlichen Informationen über die Verteilung der lokalen Porosität und der Deformationen ist unerläßlich für lokalen das richtige Projektieren des Sinterschmiedens.

In dem ersten Teil wurden die technologische Aspekte des Druckumformens des Sinters sowie die Grundlagen der Theorie des plastischen Fließens der porösen Stoffe dargestellt.

In dem Hauptteil der Arbeit wurden die bisherigen Vorstellungen über die Vorgänge der Kaltumformung der porösen, metalischen Stoffe analysiert. Es wurde auch ein mathematisches Modell des plastischen Fließens sowie ein Programm, das das Fließen in den symetrischen Schmiedestücken simulierte, erarbeitet. In der Arbeit wurde zusätzlich eine Methodik des experimentellen Verifizierens der erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Für die Charakterisierung des Fließens wurden die in der quatitativen Metallographie üblich benutzten stereologischen Parameter der Verteilung der Objekte auf der Schliffebene verwendet.