

Józef SUCHY

## SEGREGACJA PIERWIASTKÓW W WIELOSKŁADNIKOWYCH STOPACH CYNKU

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań procesu segregacji zachodzącej podczas kierunkowej krystalizacji stopów wieloskładnikowych, głównie na bazie cynku. Badania, prowadzone w warunkach krystalizacji kierunkowej ze stałą prędkością, miały na celu wykazanie wpływu niektórych parametrów opisujących proces segregacji na jego przebieg. Uzupełniono je analizę matematyczną, polegającą na numerycznych obliczeniach modelu matematycznego omawianego zjawiska a także na ocenach ilościowych uzyskanych wyników.

### 1. WSTĘP

Symulacja matematyczna procesu segregacji pierwiastków stopowych zachodzącej podczas krystalizacji pierwotnej odgrywa istotną rolę dla badania przebiegu tego zjawiska a w konsekwencji sterowania procesem krzepnięcia odlewu dla uzyskania optymalnych jego własności.

W Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej opracowano szereg algorytmów opisujących powyższe zagadnienie [1, 2, 3, 4 i in.]. Dotyczyły one głównie stopów dwuskładnikowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań krystalizacji kierunkowej wieloskładnikowych stopów cynku oraz ich analizę matematyczną. Prace te prowadzone były w ramach Międzyresortowego Problemu Badań Podstawowych Nr 20.

Najczęściej wzajemny wpływ składników stopowych na segregację każdego z nich utożsamiany jest ze zmianami zachodzącymi w procesach dyfuzyjnych w fazie ciekłej a także jej lepkością. W świetle przedstawionych dalej badań, decydujące znaczenie wydaje się mieć zmiana współczynnika rozdziálu na froncie krystalizacji, przy czym ilościowe ujęcie tego czynnika następuje szereg trudności.

### 2. OPIS BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W celu wytypowania czynników, które najistotniej wpływają na przebieg procesu segregacji przeprowadzono serię badań doświadczalnych. Niektóre z nich przedstawiono poniżej. Poddano im stopy ZnAl, ZnAlCu i ZnAlCuPb przygotowywane z atestowanych metali o czystości 99,999%, produkowane przez Zakład Doświadczalny przy Hucie Aluminium w Skawinie. Poddawano je kry-

stalizacji kierunkowej ze stałą prędkością  $v = 0,8$  cm/godz na urządzeniu opracowanym i wykonanym w Instytucie Odlewnictwa Pol. Śl. (opisane szczegółowo w [2]). Z uzyskanych tą drogą prętów wycięto próbki, poddane następnie badaniom składu chemicznego na quantometrze firmy Philips. Badania prowadzono przy użyciu przesyłony o średnicy 10 mm. Dokładność pomiaru stężenia była równa około  $\pm 0,01\%$  wag., natomiast dokładność pomiaru współrzędnej  $\pm 0,05$  cm.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki badania rozkładu pierwiastków stopowych w odlewach doświadczalnych zestawiono w tabelicy 1.

Tabelica 1

Wyniki badań doświadczalnych

Nr stopu	Stop długość pręta cm	Odległość od zarodka x cm	Stężenie wyjściowe $c_0$ % wag.			Uwagi	$\frac{c_s(x)}{c_0}$		
			Al	Cu	Pb		Al	Cu	Pb
			4	5	6		8	9	10
1	ZnAl 15,5	1,15 1,65 1,80 2,30 2,50 3,00	0,45	-	-	w	0,89 0,93 0,93 1,00 1,00 1,00		
2	ZnAl 12,0	3,60 4,10	0,70	-	-	w	0,99 1,00		
3	ZnAl 11,3	1,40 1,90 8,30 10,60 10,80 11,30	0,95	-	-	w	0,95 1,00 1,00 1,06 1,09 1,11		
4	ZnAl 11,5	2,20 2,70	1,10	-	-	w	0,98 1,00		
5	ZnAl 12,6	1,85 2,35 2,85 4,35	1,52	-	-	w	0,86 0,99 1,00 1,00		

cd. tablicy 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
6	$\frac{\text{ZnAlCu}}{7,5}$	1,50					0,81	1,08		
		2,10					0,94	1,06		
		2,60					Al:w	0,89	1,03	
		3,20	1,32	0,5	-		CU:p	-	1,02	
		4,20						1,02	0,99	
		4,80						1,01	0,99	
		6,70						1,15	0,97	
		7,50					1,19	0,93		
7	$\frac{\text{ZnAlCu}}{9,9}$	2,20					0,78	1,10		
		2,70					0,96	1,02		
		3,30					0,99	1,00		
		3,80	0,94	1,0	*	w	1,02	1,00		
		6,50					1,04	0,98		
		9,40					1,26	0,93		
		9,90					1,43	0,87		
8	$\frac{\text{ZnAlCu}}{10,3}$	2,10					0,79	1,06		
		2,60					0,93	1,03		
		3,20					1,02	1,00		
		3,70	1,12	1,03	-	w	1,01	1,02		
		6,50					1,00	1,01		
		7,00					1,05	0,95		
		9,80					1,13	0,99		
		10,30				1,26	0,94			
9	$\frac{\text{ZnAlCuPb}}{6,25}$	2,15					0,86	1,09	0,94	
		2,75					0,96	1,04	0,95	
		3,45	1,0	1,0	1,0	p	0,98	0,99	0,98	
		4,05					1,02	1,04	0,97	
		5,05					1,04	0,93	1,11	

Relacje między ilością impulsów a stężeniem określano albo za pomocą wzorców (w), albo też przy zastosowaniu proporcji, przy czym jako stężenie  $c_0$  przyjmowano średnie stężenie w centralnej części pręta (p).

Dla zilustrowania uzyskanych wyników oraz dla porównania z wynikami obliczeń numerycznych dokonano aproksymacji wyników badań na EMC. Aproksymacji dokonano wielomianem stopnia trzeciego, czyli

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3. \quad (1)$$

Obliczone współczynniki równań oraz tablice regresji dla poszczególnych stopni i pierwiastków zestawiono w tablicy 2. Wyniki badań przedstawiono także na wykresach 1-3.

Tablica 2

Współczynniki wielomianu aproksymującego zbiór 1 tablica regresji

Stop pierw.	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	Test Fishera F	Współczyn. determinacji	Współczyn. korelacji	Standardowy błąd estymacji
1-5/Al	0,7847	0,0963	0,0019	-0,0032	4,362	0,543	0,737	0,0354 <sup>x</sup>
6/Al	0,6256	0,1794	-0,0304	0,0022	17,814	0,947	0,973	0,0441
7/Al	-0,1860	0,6847	-0,1221	0,0070	67,084	0,985	0,992	0,0366
8/Al	-0,0139	0,5716	-0,0969	0,0051	36,462	0,964	0,982	0,0339
9/Al	-0,0759	0,7418	-0,1722	0,0013	13,706	0,976	0,988	0,0216
6/Cu	1,2240	-0,1247	0,0239	-0,0016	85,349	0,985	0,992	0,0083
7/Cu	1,5085	-0,2849	0,0488	-0,0026	36,979	0,973	0,986	0,0164
8/Cu	1,2436	-0,1260	0,0198	-0,0010	3,573	0,728	0,853	0,0280
9/Cu	2,5695	-1,3416	0,3813	-0,0356	4,440	0,930	0,964	0,0314
9/Pb	0,2648	0,6557	-0,2063	0,0216	11,345	0,971	0,985	0,0233

<sup>x</sup>dla  $x \leq 4,35$ 

## 4. OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKÓW ROZDZIAŁU I DYFUZJI BADANYCH STOPÓW

## 4.1. Współczynnik dyfuzji

Analizę wpływu czynników kinetycznych na zmianę współczynnika dyfuzji przeprowadzono na bazie zależności Einsteina

$$D_1 = \frac{k T}{4\pi r_1 \eta} \quad (2)$$

W rozwiązaniach uwzględniono wpływ temperatury krzepnięcia i lepkości dynamicznej stopów wieloskładnikowych, przez co w sposób utajony uwzględniono większość czynników termodynamicznych.

## 4.1.1. Zmiana lepkości dynamicznej stopu ze stężeniem

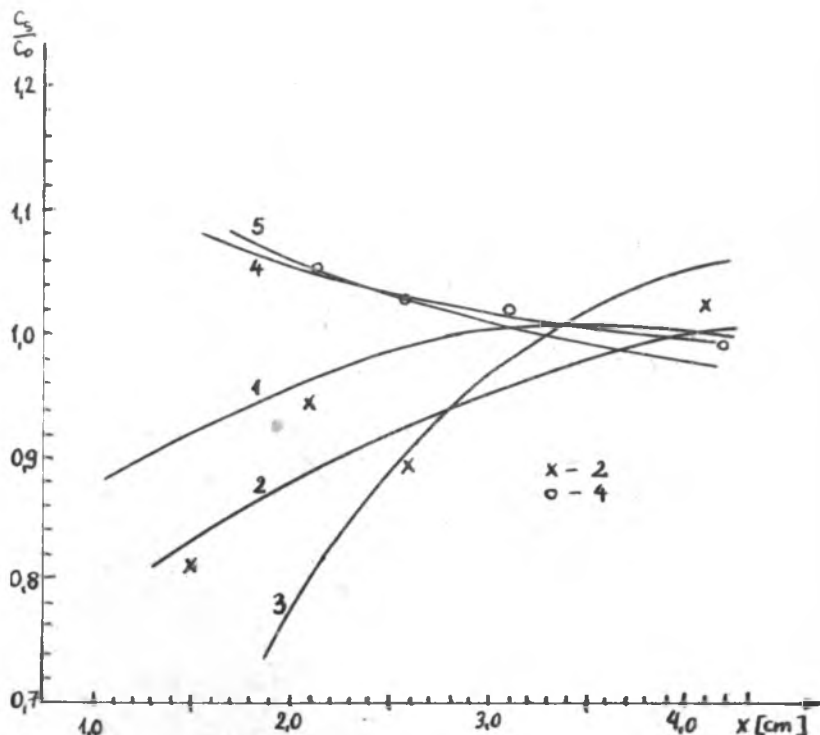
Według [5] lepkość kinematyczna czystego cynku

$$\nu_{Zn} = 0,29 \text{ [cSt]}, \quad (3)$$

czyli

$$\eta_{Zn} = 1,94 \text{ [cP]}.$$

Przyjęto, zgodnie z tendencją podaną między innymi w [5] 12 dodatek 1% Cu spowoduje 10% spadek lepkości kinematycznej. Jest to warunek bardzo ostry - por. [6].



Rys. 1. Rozkład pierwiastków stopowych na długości pręta krystalizującego kierunkowo z prędkością 0,8 cm/godz.

1 - rozkład Al w stopie ZnAl, 2 - rozkład Al w stopie ZnAl<sub>1,32</sub>Cu<sub>0,5</sub>, 3 - rozkład Al w stopie ZnAl<sub>1,12</sub>Cu<sub>1,03</sub>, 4 - rozkład Cu w stopie ZnAl<sub>1,32</sub>Cu<sub>0,5</sub>, 5 - rozkład Cu w stopie ZnAl<sub>1,12</sub>Cu<sub>1,03</sub>

Tak więc

$$\eta_{\text{ZnCu0,5}} = 0,27 \text{ [cSt]}; \quad \eta_{\text{ZnCu1}} = 0,25 \text{ [cSt]} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{ZnCu0,5}} = 1,81 \text{ [cP]}; \quad \eta_{\text{ZnCu1}} = 1,68 \text{ [cP]}$$

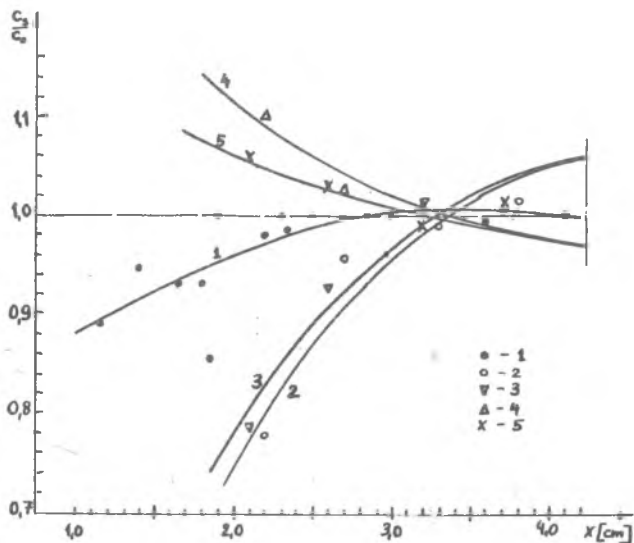
Ustalono przybliżone zależności opisujące lepkość dynamiczną stopów ZnAlCu i ZnAl w funkcji stężenia aluminium.

$$\eta_{\text{ZnAlx}} = 1,943 - 0,077 x \text{ [cP]} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ZnCu0,5Alx}} = 1,81 - 0,06 x \text{ [cP]} \quad (6)$$

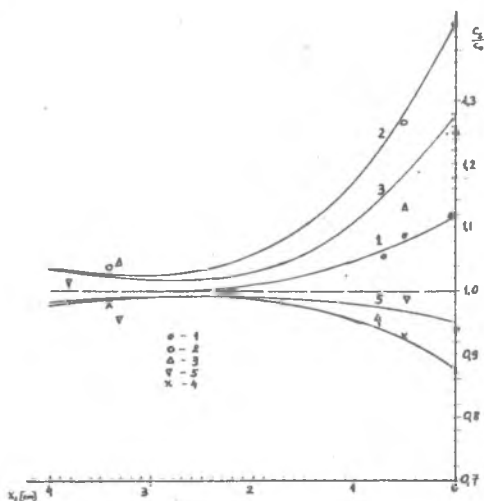
$$\eta_{\text{ZnCu1Alx}} = 1,677 - 0,043 x \text{ [cP]} \quad (7)$$

gdzie x - stężenie wagowe aluminium.



Rys. 2. Rozkład pierwiastków stopowych na długości pręta krystalizującego kierunkowo z prędkością 0,8 cm/godz (I strefa graniczna)

1 - rozkład Al w stopie ZnAl, 2 - rozkład Al w stopie ZnAl 0,94 Cu 1,0, 3. rozkład Al w stopie ZnAl 1,12 Cu 1,02, 4 - rozkład Cu w stopie ZnAl 0,94 Cu 1,0, 5 - rozkład Cu w stopie ZnAl 1,12 Cu 1,03



Rys. 3. Rozkład pierwiastków stopowych na długości pręta krystalizującego kierunkowo z prędkością 0,8 cm/godz (II strefa graniczna)

1 - rozkład Al w stopie ZnAl, 2 - rozkład Al w stopie ZnAl 0,94 Cu 1,0, 3 - rozkład Al w stopie ZnAl 1,12 Cu 1,03, 4 - rozkład Cu w stopie ZnAl 0,94 Cu 1,0, 5 - rozkład Cu w stopie ZnAl 1,12 Cu 1,03

## 4.1.2. Określenie temperatury likwidus stopu ZnAlCu

W celu wyznaczenia temperatury likwidus aproksymowano powierzchnię likwidus wykresu trójskładnikowego Zn-Al-Cu (dla małych stężeń Al i Cu) płaszczyzną, której równania jest następujące:

$$T_{\text{likw}}^{\text{ZnAlCu}} = 692,16 + 1,85 [\%Cu] - 7,40 [\%Al] \quad [K], \quad (8)$$

gdzie:

$[\%Cu]$  - stężenie wagowe Cu,

$[\%Al]$  - stężenie wagowe Al.

Do obliczeń wykorzystano wykresy równowagi według [7, 8].

## 4.1.3. Równania opisujące współczynniki dyfuzji stopu dwu- i trójskładnikowego

Przyjmując wielkości promieni atomowych aluminium i miedzi jako

$$r_{Al} = 1,43 \text{ \AA} \quad (9)$$

$$r_{Cu} = 1,275 \text{ \AA}$$

oraz wykorzystując zależności 2, 5, 6, 7, 8 możemy zapisać

$$D_{ZnAlx}^{Al} = 1,099 \cdot 10^{-7} \frac{692,16 - 7,4 x}{1,43(1,943 - 0,077 x)} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \quad (10)$$

$$D_{ZnCu0,5Alx}^{Al} = 1,099 \cdot 10^{-7} \frac{693,09 - 7,4 x}{1,43(1,81 - 0,06 x)} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \quad (11)$$

$$D_{ZnCu1Alx}^{Al} = 1,099 \cdot 10^{-7} \frac{694,01 - 7,4 x}{1,43(1,677 - 0,043 x)} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \quad (12)$$

$$D_{ZnCu0,5Alx}^{Cu} = 1,099 \cdot 10^{-7} \frac{693,09 - 7,4 x}{1,275(1,81 - 0,06 x)} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \quad (13)$$

$$D_{ZnCu1Alx}^{Cu} = 1,099 \cdot 10^{-7} \frac{694,01 - 7,4 x}{1,275(1,677 - 0,043 x)} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] \quad (14)$$

Na podstawie zależności 10 - 14 obliczono współczynniki dyfuzji dla stopów ZnAlCu dla różnych zawartości Al i Cu, wynikających z badań doświadczalnych. Zestawienie tych wyników podaje tablica 3.

Tablica 3

## Współczynniki dyfuzji stopów dwu- i trójskładnikowych

Stop	$D_{ZnAlx}^{Al}$	$D_{ZnCuAlx}^{Al}$	$D_{ZnCuAlx}^{Cu}$
	$cm^2/s$		
ZnAl 0,45	$2,77 \cdot 10^{-5}$	-	-
ZnAl 0,7	$2,80 \cdot 10^{-5}$	-	-
ZnAl 0,95	$2,82 \cdot 10^{-5}$	-	-
ZnAl 1,10	$2,83 \cdot 10^{-5}$	-	-
ZnAl 1,52	$2,87 \cdot 10^{-5}$	-	-
ZnAl 1,32 Cu 0,5	-	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$
ZnAl 0,94 Cu 1	-	$3,23 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$
ZnAl 1,12 Cu 1	-	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$

4.2. Współczynniki rozdziału aluminium

Przeprowadzono obliczenia zmiany współczynnika rozdziału aluminium na granicy faz stopu ZnAlCu ze zmianą stężenia Al. Wykonano to dla rozdziału Al, co daje wyniki pewniejsze niż współczynniki rozdziału Cu, gdyż stop ZnCu krzepnie w układzie peritektki. Obok równań powierzchni likwidus (8) należało wyznaczyć równanie powierzchni solidus. Przyjęto tutaj, tak jak poprzednio aproksymację płaszczyzną, której równanie jest:

$$T_{sol} = 692,16 + 0,4 [\%Cu] - 37 [\%Al] \quad (15)$$

Zależność ta, podobnie jak równanie płaszczyzny likwidus, słuszna jest dla małych stężeń Al i Cu.

Płaszczyzny likwidus i solidus przecinamy izotermą (płaszczyzną poziomą) przechodzącą przez punkt temperatury likwidus danego stopu. Otrzymamy wtedy równania prostych solidus wykresu trójskładnikowego w danej temperaturze, dla danego stężenia Cu:

$$\begin{aligned}
 \text{ZnCu 0,5 Al 1,32: } & 37 [\%Al] - 9,01 = 0 \rightarrow c_s^{Al} = 0,244 \\
 \text{ZnCu 1 Al 0,94: } & 37 [\%Al] - 5,50 = 0 \rightarrow c_s^{Al} = 0,149 \\
 \text{ZnCu 1 Al 1,12: } & 37 [\%Al] - 6,84 = 0 \rightarrow c_s^{Al} = 0,185
 \end{aligned} \quad (16)$$

Uzyskane tą drogą współczynniki rozdziału zestawiono w tablicy 4.



Tablica 4

Współczynniki rozdziału w stopach dwu- i trójskładnikowych

Stop	$T_{likw}$ K	$c_l^{Al}$ % wag.	$c_s^{Al}$ % wag.	$k_C^{Al}$
ZnAl 0,45 - 1,52	688,83-680,91	0,45-1,52	0,09-0,30	0,2
ZnCu 0,5 Al 1,32	683,35	1,32	0,24	0,185
ZnCu 1 Al 0,94	687,06	0,94	0,149	0,158
Zn Cu 1 Al 1,12	685,72	1,12	0,185	0,165

## 5. NUMERYCZNA ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Dla porównania wyników badań doświadczalnych z obliczeniami uzyskanymi za pomocą modelu numerycznego, symulującego przebieg zjawiska segregacji a opisanego w [1, 2, 3, 4] wykonano odpowiednie obliczenia.

Parametry dobrano na podstawie obliczeń wykonanych w rozdziale 4.

Wyniki obliczeń w zestawieniu z wynikami niektórych badań doświadczalnych przedstawiono na rysunku 4.

Tablica 5

Dane do obliczeń numerycznych

Lp.	$D$ $cm^2/s$	$k_0$	$v$ $cm/2$	Uwagi
1	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0,2	$2,222 \cdot 10^{-4}$	$k_0$ mniejsze niż to wynika z obliczeń
2	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,2	$2,222 \cdot 10^{-4}$	
3	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,158	$2,222 \cdot 10^{-4}$	
4	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,12	$2,222 \cdot 10^{-4}$	

Dla przeprowadzenia ilościowych porównań wyników obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych zastosowano następujące rozwiązanie. Jako miarę zbieżności wyników przyjęto wyrażenie:

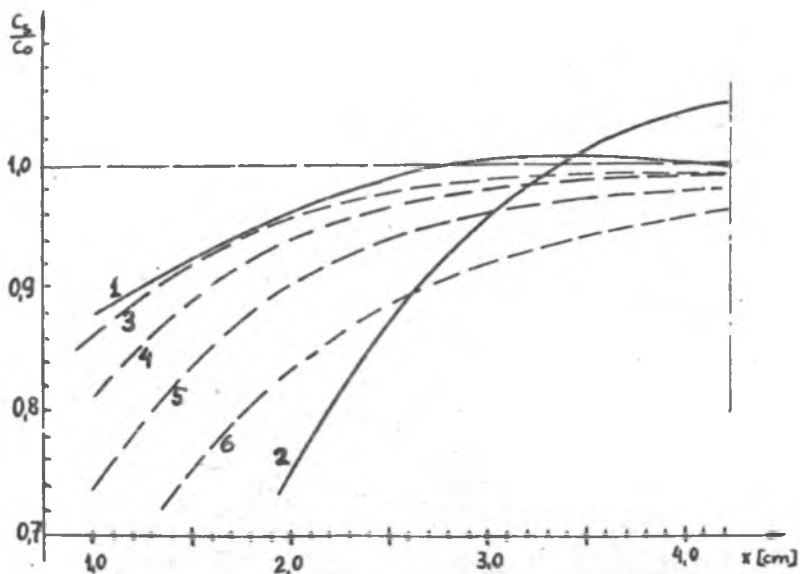
$$\varepsilon = \frac{|\Delta s|}{s_1} \quad (17)$$

gdzie:

$|\Delta s|$  - różnica całek pod krzywymi,

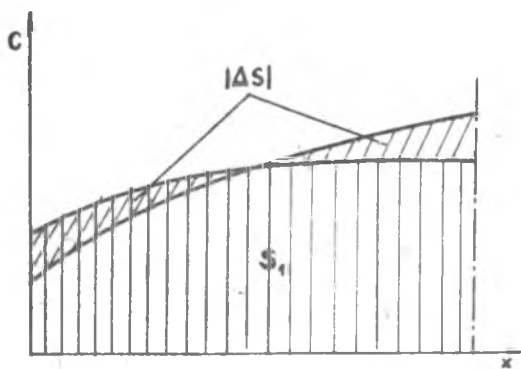
$s_1$  - całka pod krzywą uzyskaną z aproksymacji badań doświadczalnych.

Ilustrację zależności 17 jest rysunek 5.



Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych

1 - wyniki bad. dośw. ZnAl (rozkład Al), 2 - wyniki bad. dośw. ZnAl 0,94 Cu 1 (rozkład Al), 3 - wyniki obl. numerycznych dla danych 1 z tabl. 5  
 4 - wyniki obl. numerycznych dla danych 2 z tabl. 6, 5 - wyniki obl. numerycznych dla danych 3 z tabl. 6, 6 - wyniki obl. numerycznych dla danych 4 z tabl. 6



Rys. 5. Ilustracja zależności służącej do porównywania wyników badań

Całkę  $s_1$  oraz  $s$  liczone na odcinku  $x \in \langle 2 \text{ cm}, 3,5 \text{ cm} \rangle$ . Wartości uzyskane dla poszczególnych krzywych zestawiono w tabelicy 6.

Tablica 6

Porównywane krzywe			aproksymacja wyników doświadczal- nych dla stopu	$s_1$	$\xi$	Uwagi
z obl. numeryczn. dla danych:						
$D$ $\frac{cm^2}{s}$	$k_0$	$V$ $\frac{cm}{s}$				
2,8. $10^{-5}$	0,2.	2,2 $10^{-4}$	ZnAl	1,489	0,0079	
3,2. $10^{-5}$	0,2	2,2. $10^{-4}$	ZnAl <sub>0,94</sub> Cu <sub>1</sub>	1,361	0,1109	całkowanie $ \Delta s $ od $x = 2$ do 3,16 i od 3,16 do 3,5 (punkt przec.)
3,2. $10^{-5}$	0,158	2,2 $10^{-4}$	ZnAl <sub>0,94</sub> Cu <sub>1</sub>	1,361	0,0169	całkowanie $ \Delta s $ od $x = 2$ do 3,02 i od 3,02 do 3,5
3,2. $10^{-5}$	0,12	2,2 $10^{-4}$	ZnAl <sub>0,94</sub> Cu <sub>1</sub>	1,361	0,0382	całkowanie $ \Delta s $ od $x = 2$ do 2,64 i od 2,64 do 3,5

## 6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badania składu chemicznego wzdłuż osi próbki otrzymanej w procesie krystalizacji kierunkowej ze stałą prędkością  $v = 0,8$  cm/godz, aproksymowano za pomocą wielomianu stopnia trzeciego. Obliczenia te wykonano przy użyciu EMC Wang 2200. Podane w tablicy 2 dane z tablic regresji dla poszczególnych stopów wykazują wysokie współczynniki korelacji. Jedyne stopy ZnAl posiadają nieco niższy wskaźnik, co jest wynikiem przyjęcia do obliczeń dość dużej ilości próbek o różnych składach wyjściowych. Ponieważ jednak dotychczasowe badania wykazywały brak wpływu zmian stężenia aluminium (w małym zakresie) na przebieg procesu segregacji w stopie dwuskładnikowym, postanowiono zakwalifikować je do jednej grupy.

W celu przeprowadzenia analizy numerycznej uzyskanych wyników oszacowano dla nich współczynniki dyfuzji i rozdziału. Oszacowania współczynników dyfuzji dokonano przyjmując zmniejszanie się współczynnika lepkości dynamicznej w miarę zbliżania się do punktu eutektycznego, co jest warunkiem bardzo ostrym. W rzeczywistości więc zmiana współczynnika dyfuzji może być nie tak duża.

Dla porównania wyników badań doświadczalnych z obliczeniami numerycznymi zastosowano metodę opisaną w rozdziale 5. Całkowanie (dla określenia współczynnika  $\xi$ ) przeprowadzono w przedziale od 2 cm do 3,5 cm, w którym mieści się największa ilość wyników eksperymentu. Ponadto poza tym przedziałem ( $x > 3,5$  cm) krzywe nie stabilizują się dokładnie na pozio-

mie 1,0, co spowodowane jest różnicami długości prętów otrzymywanych drogą krystalizacji kierunkowej, a więc wcześniejszego spiętrzenia w pobliżu krańca próbki [2].

Porównania obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych wykazują bardzo dużą zgodność dla stopów dwuskładnikowych (współczynnik  $\xi = 0,0079$ ). Dla stopu trójskładnikowego zgodność ta jest nieco gorsza i dla danych obliczonych w rozdziale 4  $\xi = 0,0169$ . Jak widać z tablicy 6 wpływ współczynnika dyfuzji na zmiany w procesie nie jest decydujący, co powoduje duże rozbieżności wyników ( $\xi = 0,11$ ). Dalszą poprawę zgodności wyników można by uzyskać, wprowadzając zmienność współczynnika rozdziału i wpływ segregacji innych pierwiastków na tę zmienność, odgrywającą dużo większą rolę niż w przypadku stopów dwuskładnikowych.

Ciekawe wyniki obserwuje się z porównania stopów ZnAlCu o różnym stężeniu Al. Niewielka zmiana stężenia aluminium powoduje zauważalną zmianę w procesie segregacji (zmianę współczynnika dyfuzji można pominąć). Zmiana współczynnika dyfuzji sugerowałaby tu nawet zwiększenie stopnia segregacji, co jest niezgodne z uzyskanymi wynikami doświadczalnymi. Zarówno te wyniki, jak i uzyskane dla stopów o różnym stężeniu Cu dowodzą, iż decydujący wpływ na przebieg procesu segregacji ma wielkość współczynnika rozdziału. Wpływ jego jest znacznie większy niż współczynnika dyfuzji.

Wpływ czwartego pierwiastka (Pb) jest podobny jak dalsze zwiększenie stężenia aluminium.

Odwrotna segregacja miedzi w stopach ZnAlCu i ZnAlCuPb wynika z faktu, że współczynnik rozdziału Cu w stopie ZnCu ma wartość większą od jedności.

## 7. WNIOSKI

1. Porównanie wyników badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych wykazuje ich zgodność.

2. Przeprowadzone badania wykazują, że decydujący wpływ na przebieg procesu segregacji stopu wieloskładnikowego ma wielkość współczynnika rozdziału dla poszczególnych pierwiastków.

3. Dla zwiększenia dokładności obliczeń celowe jest uwzględnianie zmienności współczynnika rozdziału w trakcie procesu.

4. Dla poprawnego określenia współczynnika rozdziału i dyfuzji konieczne jest przeprowadzenie badań nad zamodelowaniem postaci wieloskładnikowego układu równowagi.

5. Wprowadzenie do stopu czwartego i następnych pierwiastków stanowi utrudnienie w ilościowym ujęciu procesu. Należy poszukiwać zależności empirycznych, które pozwoliłyby tę trudność wyeliminować.

## 8. LITERATURA

- [1] Jura S., Suchy J.: Segregacja pierwiastków stopowych podczas krzepnięcia kierunkowego odlewu, Krzepnięcie metali i stopów Z. 2, KO PAN O/Katowice, Wyd. Ossolineum (w druku).
- ] Suchy J.: Kinetyka segregacji w stopach dwuskładnikowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1978.
- ] Jura S., Mochnacki B., Suchy J.: Model matematyczny kinetyki segregacji odlewu krzepnącego kierunkowo, Archiwum Hutnictwa Nr 2, 1980.
- ] Mochnacki B., Suchy J., Modelowanie wpływu czynników technologicznych na proces segregacji pierwiastków stopowych w krzepącym odlewie Zbiór referatów XVIII Sympozjonu PTMTS, Gliwice 1979.
- ] Korolkow A.M.: Litiejnyje svojstva metalow i spławow. Izd. Nauka, Moskwa 1967.
- ] Sakwa W., Jura S., Suchy J.: Kinetyka segregacji w stopach wieloskładnikowych, Sprawozdanie z MPBP Nr 20, Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej Gliwice 1979.
- ] Hansen H., Anderko K.: Constitution of Binary Alloys. N.York-Toronto-London, Mc Hraw-Hill Book Co. Inc., 1958.
- ] Elliot R.P.: Constitution of Binary Alloys. Mc Hraw-Hill Book Co., N. York 1965.

## СВАДИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВО МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦИНКОВЫХ СПЛАВАХ

## З я м е

В работе представлены выбранные результаты исследований процесса ликвации, возникающей во время регулируемой кристаллизации многокомпонентных сплавов, преимущественно, на базе цинка. Исследования, проводимые в условиях регулируемой кристаллизации с постоянной скоростью, поставили перед собой задачу обнаружить влияние некоторых параметров, описывающих процесс свадии на его ход. Они пополнены математическим анализом, заключающимся в терических расчетах математической модели обсуждаемого явления и количественных полученных результатов.

## SEGREGATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN ZINC COMPLEX ALLOYS

## I м м а г у

The paper presents the chosen results of research on the process of segregation taking place during the directional crystallization of complex alloys, based mainly on zinc. The research, carried out under the conditions of constant speed directional crystallization, aimed at presenting the influence of some parameters describing the process of segregation in its course. It has been complemented by the mathematical analysis based on numerical calculations of the mathematical model of the discussed phenomenon and on the quantitative estimation of the obtained results.