

PACS numbers: 81.30.Mh, 83.10.Tv, 87.15.Vv, 87.17.-d, 87.17.Ee

Кінетика зародкування за комірчастого розпаду твердих розчинів в стопах системи мідь–титан

Т. С. Гаценко

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03680, МСП, Київ-142, Україна*

В температурному інтервалі 848–973 К досліджено кінетику зародкування під час комірчастого розпаду в стопах міді з 3,68–6,00 ат. % титану. Методом кількісної статистичної металографії одержано величини кількості комірок N на одиницю об'єму за різного часу старіння. В комплексі основних параметрів кінетики утворення комірок визначено: кількість ймовірних потенційних місць \bar{N} утворення комірок в одиницю часу, частоту v_s актів утворення комірок в одиницю часу та період нестационарності даного процесу. Разом з тим визначено швидкості утворення комірок \dot{N} за різних температур старіння та побудовано їхні часові залежності, за допомогою яких показано нестационарний характер даної величини.

В температурном интервале 848–973 К изучена кинетика зарождения при ячеистом распаде твёрдых растворов в сплавах меди с 3,68–6,00 ат. % титана. Методом количественной статистической металлографии получены величины количества ячеек N на единицу объёма при разном времени старения. В комплексе основных параметров кинетики образования ячеек определены: количество вероятных потенциальных мест \bar{N} зарождения ячеек в единицу времени, частота v_s актов образования ячеек в единицу времени и период нестационарности данного процесса. Вместе с тем определены скорости образования ячеек \dot{N} при разных температурах старения и построены их временные зависимости, с помощью которых показан нестационарный характер данной величины.

Kinetics of cells' nucleation at cellular decomposition of solid solutions in copper alloys with 3.68–6.00 at. % of titanium is investigated within the temperature range of 848–973 K. Values of cells number per unit volume, N , at various times of ageing are obtained, using numerical statistical metallography. Among main parameters of kinetics of cells' nucleation, namely, a number of probable potential places of cells' nucleation per time unit, \bar{N} , frequency of acts of cells' formation per time unit, v_s , and period of instability of this process are determined. The cells' formation rates, \dot{N} , at various ageing

temperatures are determined, and their temperature dependences are plotted. These dependences demonstrate nonstationary nature of this value.

Ключові слова: зародкування, швидкість утворення комірок, період нестационарності, комірчастий розпад, відпал.

(Отримано 8 квітня 2014 р.)

1. ВСТУП

Відомо, що залежно від температурного інтервалу відпуску пересичені тверді розчини мідь–титан розпадаються за різними механізмами [1]. В інтервалі температур 850–1070 К ці стопи, як показано в [2], старіють переважно за комірчастим механізмом.

Дослідження загальної кінетики комірчастого розпаду пересичених твердих розчинів, як і у випадку цілої низки інших фазових перетворень, включає в себе дослідження кінетики зародкування та наступного росту зародків нової фази.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У даній роботі досліджено кінетику утворення комірок у стопах міді з титаном в інтервалі температур 848–973 К. Стопи міді з 3,68 (2,80), 4,0 (3,04), 4,46 (3,40), 4,98 (3,80), 5,69 (4,35) та 6,00 (4,59) ат. % (% мас.) титану (які умовно позначено як 1, 2, 3, 4, 5, 6 відповідно) після гомогенізації за 1170 К впродовж 5 годин та гартування у воді зістарювали за температур 848, 873, 898, 923, 948 та 973 К.

Методом кількісної статистичної металографії [3] визначено кількість комірок N в одиниці об'єму досліджуваних стопів, що утворились під час ізотермічного відпалу в зазначеному температурному інтервалі. На підставі припущення, що зародки комірок мають близьку до сферичної форму, число центрів нової фази N визначиться як

$$N = 1,05 \bar{n} / (\pi \bar{q}^2),$$

де \bar{n} — середнє число комірок, що припадають на одиницю довжини випадково проведеної на поверхні зразка лінії (перетинаються нею), \bar{q} — середня довжина ділянки лінії, що перетинає одну комірку.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Побудовані ізотерми величини N залежно від часу старіння τ , приклад яких наведено на рис. 1, для всіх зазначених стопів та вказаного інтервалу температур мають сигмоподібний вигляд та опису-

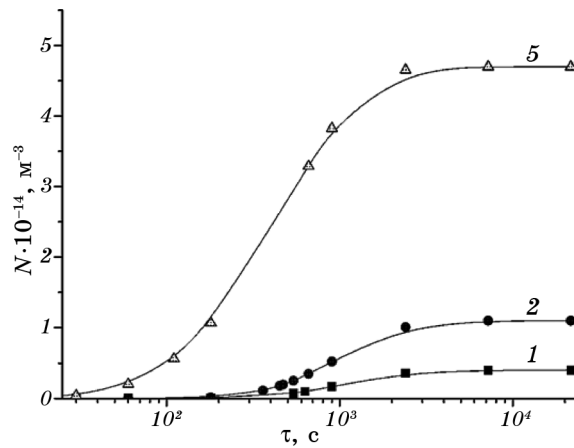


Рис. 1. Залежність кількості комірок N від часу ізотермічного відпалу τ за температури 848 К для ступів 1, 2 та 5.

ються співвідношенням:

$$N = \bar{N} \{1 - \exp[-v_s \tau \exp(-\tau_n/\tau)]\}, \quad (1)$$

де \bar{N} — кількість ймовірних потенційних місць утворення комірок, якими є межі зерен, v_s — частота актів утворення комірок в одиницю часу, τ_n — період нестационарності або фактор Зельдовича [4] з розмірністю часу.

За даними N визначено величини \bar{N} , τ_n та v_s у досліджуваних ступах 1–6 за всіх температур старіння таким чином, щоб відповідні їм криві залежностей $N(\tau)$, розраховані за рівнянням (1), найбільш точно збігалися з експериментальними даними. Визначені параметри утворення комірок подано в таблиці.

Зазначимо, що на ізотермах $N(\tau)$ (рис. 1) спостерігаються три стадії процесу зародкування нової фази та утворення комірок. Перша стадія (початкова) характеризує протікання процесу в нестационарному режимі і обмежується часом τ_n . Друга (або середня) — відповідає стаціонарному режимові, тобто стабілізованому розвитку формування комірок, та характеризується лінійною ділянкою на залежності $N(\tau)$. Третя стадія (завершальна) пов'язана із затуханням процесу зародкування, що пов'язане з вичерпанням потенційних місць утворення комірок \bar{N} .

Продиференціювавши рівняння (1) за часом, одержуємо вираз для обчислення швидкості утворення комірок \dot{N} :

$$\dot{N} = v_s \bar{N} \exp\left[-\frac{\tau_n}{\tau} - v_s \exp\left(-\frac{\tau_n}{\tau}\right)\right] \left(1 + \frac{\tau_n}{\tau}\right). \quad (2)$$

Підставивши значення параметрів \bar{N} , τ_n та v_s до рівняння (2), одержуємо величини швидкості утворення комірок \dot{N} для стопів 1–6 у будь-який момент старіння за даної температури. Залежності \dot{N} від τ подано на рис. 2. Вони являють собою криві з максимумом, який відповідає значенням максимальної швидкості утворення комірок \dot{N}_{\max} та часу τ_{\max} , за який вона досягається (див. табл.). Це вказує на те, що величина \dot{N} не є сталою і залежить від часу старіння τ . За різних температур старіння криві, представлені на рис. 2, подібні до тих, на яких на початкових стадіях утворення комірок величина \dot{N} зростає, а згодом, досягнувши значення \dot{N}_{\max} за час τ_{\max} , який є близьким до часу нестационарності τ_n , починає спадати внаслідок поступового вичерпання потенційних місць зароджування \bar{N} .

ТАБЛИЦЯ. Параметри кінетики утворення комірок у стопах мідь–титан.

Стоп	T, K	$\bar{N} \cdot 10^{-14}, m^{-3}$	τ_n, c	$v_s \cdot 10^3, c^{-1}$	$\dot{N}_{\max} \cdot 10^{-11}, m^{-3} \cdot c^{-1}$	τ_{\max}, c
1	848	0,4	630	1,2	0,26	540
	873	0,9	600	1,7	0,8	480
	898	1,2	560	1,9	1,2	500
	923	0,7	590	1,6	0,6	560
2	848	1,1	540	1,3	0,8	470
	873	1,3	570	1,5	1,04	460
	898	1,8	510	2,1	1,92	440
	923	1,3	520	1,7	1,18	490
3	873	1,8	480	2,8	2,4	390
	898	2,5	400	3,0	3,4	340
	923	2,1	420	2,2	2,5	390
	948	1,1	310	1,4	1,09	360
4	873	3,0	350	3,4	5,0	290
	898	4,0	330	3,8	7,3	260
	923	4,8	270	4,1	9,9	230
	948	2,6	280	3,1	4,3	260
	973	1,5	140	2,8	2,7	160
5	848	4,7	60	2,0	7,4	110
	873	4,3	75	7,8	19,9	80
	898	5,3	70	6,7	22,2	80
	923	5,8	80	6,4	23,0	90
	948	3,0	80	6,5	11,9	85
	973	3,2	70	3,5	7,9	100
6	873	4,8	23	8,4	29,5	40
	898	5,3	21	7,1	28,6	30
	923	7,1	7	7,0	42,8	15
	948	3,9	20	7,7	11,8	30
	973	3,9	39	3,8	12,24	74

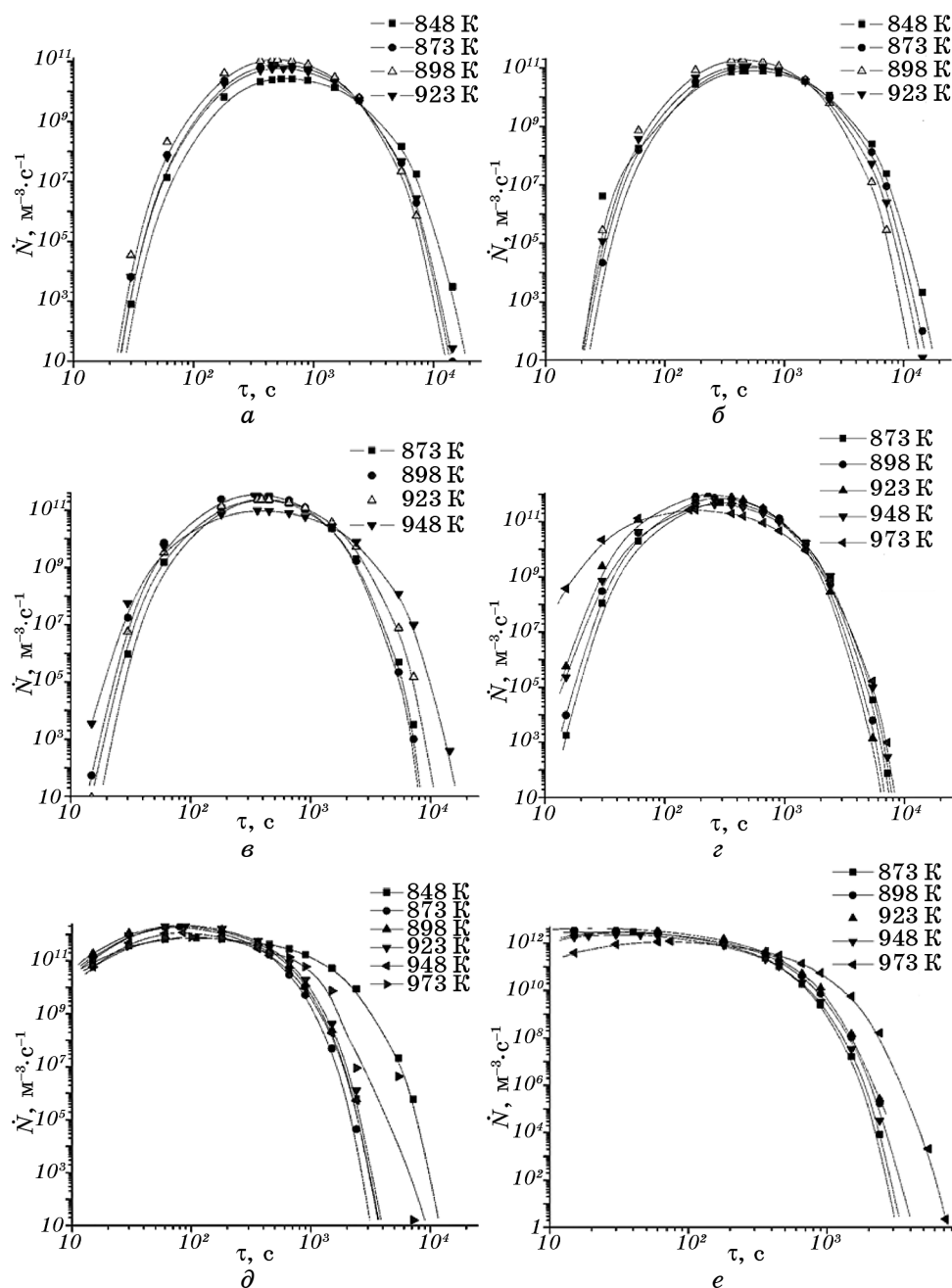


Рис. 2. Залежності швидкості утворення комірок від часу ізотермічного відпаду ступів за різних температур: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (з), 5 (д) та 6 (е).

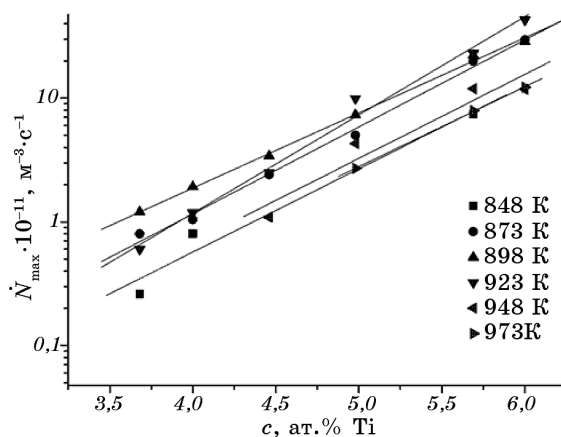


Рис. 3. Концентраційні залежності ізотерм \dot{N}_{\max} в стопах мідь–титан.

Лише в стопах 5 та 6 у зв'язку зі швидким завершенням етапу нестационарності τ_n зростання величини \dot{N} та досягнення нею максимуму \dot{N}_{\max} на початковій стадії утворення комірок відбуваються швидше, аніж у стопах з нижчою концентрацією титану. Ізотермічні залежності впливу вмісту титану в стопі на значення \dot{N}_{\max} (рис. 3) мають лінійний характер.

Таким чином, дослідженням кінетики утворення комірок у ході комірчастого розпаду твердих розчинів на основі міді в температурному інтервалі 848–973 К засвідчено, що швидкість зародкоутворення, відповідно до теорії Дж. Кана [5], не є стаціонарною величиною.

4. ВИСНОВКИ

1. Визначено параметри кінетики зародкування під час комірчастого розпаду в стопах міді з 3,68–6,00 ат. % Ті в температурному інтервалі 848–973 К.
2. Дослідженням кінетики утворення комірок у ході комірчастого розпаду твердих розчинів на основі міді підтверджено нестационарність величини швидкості зародкоутворення.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. К. В. Чуистов, *Республиканский межведомственный сборник «Металлофизика»* (Київ: Наукова думка: 1970), вып. 32, с. 38.
3. Л. Н. Лариков, О. А. Шматко, *Ячеистый распад пересыщенных твёрдых растворов* (Київ: Наукова думка: 1976).
3. D. Turnbull and H. N. Treafitis, *Trans. Met. Soc. AIME*, **212**, No. 1: 33 (1958).

4. Я. Б. Зельдович, *ЖЭТФ*, **12**, № 11–12: 525 (1942).
5. J. W. Cahn, *Acta Met.*, **4**, No. 5: 449 (1956).

REFERENCES

1. K. V. Chuistov, *Respublikanskiy Mezhdomstvennyy Sbornik 'Metallofizika'* (Kiev: Naukova Dumka: 1970), Iss. 32, p. 38 (in Russian).
3. L. N. Larikov and O. A. Shmatko, *Yacheistyy Raspad Peresyshchennykh Tvyordykh Rastvorov (Cellular Precipitation of the Supersaturated Solid Solutions)* (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
3. D. Turnbull and H. N. Treafis, *Trans. Met. Soc. AIME*, **212**, No. 1: 33 (1958).
4. Ya. B. Zeldovich, *Zh. Ehksp. Teor. Fiz.*, **12**, Nos. 11–12: 525 (1942) (in Russian).
5. J. W. Cahn, *Acta Met.*, **4**, No. 5: 449 (1956).