

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

PACS numbers: 61.72.sd, 61.72.Yx, 64.60.qj, 66.30.Lw, 81.05.Vx, 81.10.Jt, 81.30.Mh

Вплив третього елемента на швидкість коміркового розпаду в стопі Cu–5,69 ат. % Ti

Т. С. Гаценко, О. А. Шматко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03680, МСП, Київ-142, Україна*

Досліджено вплив легування третім елементом (Ni, In, Ga, Mn, Co, Cr, Fe, Sn та Zr) на швидкість перебігу коміркового розпаду в стопі міді з 5,69 ат. % титану за температури 873 К. Показано, що лише нікель та індій пришвидшують його, тоді як решта гальмує. Проаналізовано величини узагальненого статистичного моменту m_s та їх різницю між домішковим елементом та металом-основою ($m_{s3} - m_{sCu}$) в стопі Cu–5,69 ат. % Ti.

Исследовано влияние легирования третьим элементом (Ni, In, Ga, Mn, Co, Cr, Fe, Sn та Zr) на скорость протекания ячеистого распада в сплаве меди с 5,69 ат. % титана при температуре 873 К. Показано, что только никель и индий ускоряют его, тогда как остальные тормозят. Проанализированы величины обобщённого статистического момента m_s и их разность между примесным элементом и металлом-основой ($m_{s3} - m_{sCu}$) в сплаве Cu–5,69 ат. % Ti.

The influence of alloying with the third element (Ni, In, Ga, Mn, Co, Cr, Fe, Sn, and Zr) on the rate of the cellular decomposition in the alloy of copper with 5.69 at. % titanium at the temperature of 873 K is investigated. As shown, nickel and indium expedite the cellular precipitation, while the others hinder it. The values of generalized statistical moment m_s and their difference ($m_{s3} - m_{sCu}$) for different alloying elements and base metal in the Cu–5.69 at. % Ti alloy are analysed.

Ключові слова: легування, комірковий розпад, коефіцієнт дифузії, статистичний узагальнений момент атома.

(Отримано 22 березня 2014 р.)

1. ВСТУП

Вплив домішки третього елемента на рухомість меж зерен (МЗ) у стопах є одним з ключових питань дослідження кінетики ініційо-

ваних на них таких фазово-структурних перетворень як рекристалізація [1, 2], ріст зерен [3], комірковий розпад (КР) пересичених твердих розчинів [4, 5] та ін.

Розглянемо означений вплив на кінетику КР. Одним з основних її параметрів є швидкість міграції висококутових меж зерен (v), що являють собою фронт платівкових областей КР — комірок, чия структура характеризується величиною міжплатівкової відстані (l). Останній параметр є шириною шляху дифузії атомів розчиненого елемента і, разом з коефіцієнтом дифузії цих атомів, рухомим фронтом коміркової реакції D_b , товщиною фронту λ та сегрегаційним фактором s , пов'язаний з величиною v співвідношенням $v = 4s\lambda D_b/l^2$ [6].

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У даній роботі досліджено вплив домішки третього елемента (див. табл. 1) на v та потрібний добуток $s\lambda D_b$ для стопу Cu–5,69 (4,35) ат. (мас.) % Ti за температури 873 К.

Величину v визначено методом статистичної оптичної металографії. На підставі цієї величини за вищенаведеним співвідношенням розраховано значення $s\lambda D_b$ для величини $l = 1,5 \cdot 10^{-7}$ м, на яку за 873 К домішка третього елемента практично не впливає.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В таблиці 1 десять елементів розташовано в порядку зменшення величини v . Отже, лише нікель та індій прискорюють КР, тоді як решта гальмує. Щодо пояснення зміни $s\lambda D_b$, то тут треба брати до уваги певні варіації сегрегаційного фактора.

Стосовно ж пришвидшення або гальмування руху фронту коміркової реакції третім елементом донині немає остаточного розуміння. У низці досліджень до аналізу цього впливу залучалися такі фактори як:

- розмірний фактор, тобто співвідношення атомних радіусів третього (r_3) та основного (r_1) елементів або різниця їхніх атомних об'ємів ($\Omega_3 - \Omega_1$) [7, 8],
- різниця між температурами топлення елемента-розчинника (T_{m1}) та третього елемента (T_{m3}) [9, 10],
- зміна вільного об'єму меж зерен α під впливом домішкових атомів, що сегрегують на них [9–11],
- максимальна розчинність третього елемента (c_l) в металі-основі стопу,
- вплив концентрації третього елемента (c_3) на крутизну концентраційної залежності параметра кристалічної ґратниці металу-основи стопу [3],

– адсорбційна активність третього елемента на МЗ.

Окремі успіхи в поясненні пришвидшення або ж гальмування коміркового розпаду в окремо взятій системі, що базуються на аналізі різниці розмірів атомів, максимальної розчинності домішки в металі-основі, її температури топлення або ж її впливу на крутизну концентраційної залежності параметра кристалічної ґратниці металу-розчинника, на інших системах не мали підтвердження [3].

Зіставивши дані з таблиць 1, 2 і порівнявши дані стосовно r_a/r_{Cu} , $(T_{m3} - T_{Cu})$, $(\Omega_3 - \Omega_{Cu})$ (атомний об'єм Ω було розраховано через атомний радіус за Гольдшмідтом (r_g) за формулою: $\Omega = (2^{3/2}r_g)^3/4$), (r_a/r_{Cu}) з ν , яка характеризує швидкість руху фронту коміркової реакції, можна дійти висновку що зв'язок цих параметрів з перебігом коміркового розпаду в стопі Cu–4,35 ат.% Ті більшість з вищезгаданих теорій так само не завжди дозволяють встановити.

У [16] висловлено припущення, що чим нижча розчинність домішки в основному металі, тим ефективніше понижується енергія утворення вакансій в ґратниці металу-основи. Підвищення ж концентрації вакансій у стопі має, згідно з [3, 17, 18], прискорювати комірковий розпад. Як видно з табл. 2, вплив третього елемента на ν не виявляє беззастережного зв'язку з його максимальною розчинністю в основному металі. До категорії пояснень окремих випадків впливу легування на швидкість коміркового розпаду можна віднести праці [19, 20], де для цього було використано конфігураційну модель речовини Самсонова–Прядка [21].

Можна припустити, що загальнішим є аналіз впливу третього еле-

ТАБЛИЦЯ 1. Величини ν , $s\lambda D_b$, r_g та Ω_3 при 873 К в стопі Cu–5,69(4,35) ат. (мас.) % Ті з додаванням третього елемента.

Вміст третього елемента, ат. %	$\nu \cdot 10^8$, м/с	$s\lambda D_b \cdot 10^{22}$, м ³ /с	$r_g \cdot 10^9$, м [12]	r_g/r_{Cu}	$\Omega_3 \cdot 10^3$, нм ³	$(\Omega_3 - \Omega_{Cu}) \cdot 10^3$, нм ³
0,5Ni	10,8	6,08	0,125	0,977	11,05	-0,81
0,5In	9,0	5,06	0,162	1,266	24,05	12,19
Cu	–	–	0,128	–	11,86	–
5,69Ti	7,0	3,94	0,146	1,141	17,60	5,74
0,4Ga	4,7	2,64	0,122	0,953	10,27	-1,59
0,5Mn	4,5	2,53	0,130	1,016	12,43	0,57
0,5Co	3,7	2,08	0,125	0,977	11,05	-0,81
0,6Cr	3,4	1,91	0,125	0,977	11,05	-0,81
0,5Fe	3,1	1,74	0,124	0,969	10,79	-1,07
0,3Sn	3,1	1,74	0,151	1,180	19,48	7,62
0,3Zr	1,9	1,07	0,158	1,234	22,31	10,45

ТАБЛИЦЯ 2. Зіставлення швидкостей росту комірок при 873 К в стопі Cu–5,69 (4,35) ат. (мас.) % Ti з додаванням третього елемента з максимумом розчинності (c_l) в твердому розчині, його температурою топлення (T_d) та температурою топлення третього елемента (T_{m3}).

Вміст третього елемента, ат. %	$\nu \cdot 10^8$, м/с	c_l , ат. % [13, 14]	T_d , К [13, 14]	T_{m3} , К [15]	$(T_{m3} - T_{Cu})$, К
0,5Ni	10,8	Необмеж.	–	1728,0	371,6
0,5In	9,0	18,20	847	429,4	–927
Cu	–	–	–	1356,4	–
5,69Ti	7,0	–	–	1940,0	583,6
0,4Ga	4,7	20,00	893	302,7	–1053,7
0,5Mn	4,5	Необмеж.	–	1517,0	160,6
0,5Co	3,7	8,80	1385	1765,0	408,6
0,6Cr	3,4	1,28	1349	2133,0	776,6
0,5Fe	3,1	4,00	1369	1809,0	452,6
0,3Sn	3,1	11,00	623	504,9	–851,5
0,3Zr	1,9	Нерозчин.	–	2125,0	768,6

мента на ν , з огляду на його роль в утворенні фази випадання [22], тобто його адсорбційної активності. Власне в ранніх працях [3] результати впливу додаткового легування на швидкість росту комірок інтерпретувалися саме з точки зору наявності сегрегацій на межах зерен (у випадку гальмування даного процесу) або ж їх відсутності за підвищених значень ν , близьких до таких у нелегованому стопі. Однак цей підхід до проблеми не дає однозначної відповіді.

Автори [23, 24], проаналізувавши вплив легування на комірко-вий розпад у стопах свинець–олово, показали, що горофобні (поверхнево-інертні) домішки гальмують його, тоді як горофільні (поверхнево-активні) можуть і гальмувати, й пришвидшувати даний процес. До аналізу своїх результатів автори [24] залучають співвідношення, яке описує зміну швидкості міграції фронту коміркової реакції внаслідок легування:

$$\nu \sim \frac{8V_m s \lambda D_b}{RTl^2} \left(G_c - \frac{2\sigma}{l} - \frac{k\gamma}{r_c} - G_{br} \right). \quad (1)$$

Тут G_c — хімічна рушійна сила процесу, σ та γ — питома поверхнева енергія міжфазних меж та енергія меж зерен, V_m — молярний об'єм стопу, T — температура старіння, k — співвідношення розподілу домішки на межі та в об'ємі зерна, G_{br} — енергія гальмування межі зерна домішкою.

Позаяк горофобні домішки підвищують σ та γ , сприяючи тим виникненню високої $G_{br} \propto (1 - k^2)$, загальна рушійна сила буде спадати, а рух фронту коміркової реакції гальмуватися. У випадку ж горофільних домішок їхній вплив на величину ν визначатиметься конкуренцією двох факторів: пониженням σ та γ і підвищенням D_b та G_{br} . Власне з цим пов'язаний двоякий характер впливу горофільних домішок на швидкість коміркового розпаду, зазначений в [24].

Отже, швидкість руху фронту коміркової реакції має залежати від поведінки домішкових атомів на фронті коміркової реакції або перед ним. У даній роботі нами вперше було запропоновано щодо цієї поведінки атомів домішки (горофільність або горофобність) скористатись теоретичними уявленнями про, так званій, статистичний узагальнений момент атома (m_s), запропонований в [25] для оцінки поверхневої активності реальних металів на підставі уявлень [26] про узагальнений момент іона

$$m_i = eZ/r_i.$$

Тут e — заряд електрона, Z — порядковий номер елемента в періодичній таблиці, eZ — заряд іона, r_i — радіус іона за Гольдшмідтом.

Згідно із статистичною моделлю атома Томаса-Фермі [27], величина m_s визначається співвідношенням:

$$m_s = eZ\varphi(\eta)/r_g,$$

в якому r_g — радіус за Гольдшмідтом для координаційного числа 12, $\varphi(\eta)$ — функція безрозмірного параметра $\eta = r_g z^{1/3}/(0,885a_0)$, a_0 — Борів радіус. Функцію φ визначають з рівняння Томаса-Фермі $\varphi'' - \varphi^{3/2}/\eta^{1/2} = 0$ за крайових умов: $\varphi(0) = 1$, $\varphi(\infty) = 0$ та $\varphi'(\infty) = 0$. Значення r_g можна взяти з [12], а значення функції $\varphi(\eta)$ — з таблиць, наведених в [27].

Величини m_s та їх різниця між домішковим елементом та металом-основою ($m_{s3} - m_{sCu}$) в стопі Cu-4,35 ат. % Ті наведено в табл. 3.

Згідно з [25], поверхнево-активна (горофільна) домішка має $m_{s3} < m_s$, а поверхнево-інактивна (горофобна), навпаки: $m_{s3} > m_{sCu}$.

З таблиці 3 видно, що горофобні (стосовно міді) домішки, такі як галій, кобальт та залізо, гальмують ріст комірок у стопі Cu-4,35 ат. % Ті, тоді як нікель (також горофобний стосовно міді) не знижує, а навпаки, підвищує ν . В [26] це пояснюється тим, що вплив горофобної домішки на поверхневу енергію σ тісно пов'язаний з концентрацією основного легувального елемента (в нашому випадку титану) в стопі. За незначного вмісту цього елемента (C_2) зростання концентрації горофобної домішки (C_3) спричиняє підвищення σ . Однак із зростанням C_3 та C_2 (вище так званої буферної концентрації C_{bf}) цей ефект зменшується, і домішка вже не підвищує, а знижує σ (див. рис. 1). І чим більше зростають C_2 та C_3 , тим помітніше спадає

ТАБЛИЦЯ 3. Вплив домішок на швидкість руху фронту коміркової реакції в стопі Cu–5,69 (4,35) ат. (мас.) % Ti при 873 К.

Вміст третього елемента, ат. %	$\nu \cdot 10^8$, м/с	z	$r_g \cdot 10^9$, м [15]	η	$\varphi(\eta)$ [6]	$m_s \cdot 10^9$, Кл/м	$(m_{s3} - m_{sCu}) \cdot 10^9$, Кл/м
0,5Ni	10,8	28	0,125	8,105	0,0363	1,303	0,091
0,5In	9,0	49	0,162	12,658	0,0154	0,746	-0,466
Cu	–	29	0,128	8,397	0,0334	1,212	–
5,69Ti	7,0	22	0,146	8,735	0,0311	0,751	-0,461
0,4Ga	4,7	31	0,122	8,183	0,0351	1,429	0,217
0,5Mn	4,5	25	0,130	8,117	0,0356	1,097	-0,115
0,5Co	3,7	27	0,125	8,007	0,0364	1,260	0,048
0,6Cr	3,4	24	0,125	7,699	0,0390	1,200	-0,012
0,5Fe	3,1	26	0,124	7,844	0,0377	1,267	0,055
0,3Sn	3,1	50	0,151	11,878	0,0175	0,928	-0,284
0,3Zr	1,9	40	0,158	11,538	0,0186	0,754	-0,458

величина σ . Таке пояснення впливу нікелю на швидкість КР у стопі Cu–5,69 (4,35) ат. (мас.) % Ti свідчить про те, що вміст титану в цьому стопі є вищим за C_{bf} . Разом з тим, для цих елементів є справедливим $m_{sNi} > m_{sCu} > m_{sTi}$, тобто домішка нікелю має сприяти активізації процесу адсорбції титану на межах зерен у міді.

Вплив горофільних домішок також має свої особливості. Вище зазначалось, що за умови пріоритету сил гальмування меж зерен такими домішками над ефектом зниження поверхневої енергії меж, згідно з (1), відбувається гальмування росту комірок. Це спостерігається для більшості досліджених у даній роботі горофільних домішок. Коли ж, навпаки, швидкість росту комірок зростає, це свідчить про те, що зниження поверхневої енергії домінує над силою домішкового гальмування. Наприклад, відомо [3], що олово в стопі мідь–титан у кількості, більшій за 0,5 ат.%, гальмує ріст комірок, а менше за 0,2 ат.% — пришвидшує його. В даній же роботі показано (див. табл. 3), що олово вже за 0,3 ат.% гальмує комірковий розпад. Таким чином, можна зробити висновок, що в межах 0,2–0,3 ат.% олово змінює знак впливу на величину ν в стопах мідь–титан. Зауважимо, що інші горофільні домішки, за відповідних співвідношень C_2 та C_3 та низьких концентрацій, мають пришвидшувати КР, а за вищого вмісту домішки — сповільнювати його.

Цікаво й те, що горофільна домішка може сповільнювати ν не лише силою домішкового гальмування, а ще й протидією утворенню сегрегацій основного легувального елемента. Це відбувається лише за умови виконання нерівності $m_{s3} < m_{s2}$. В стопі Cu–5,69 (4,35) ат.

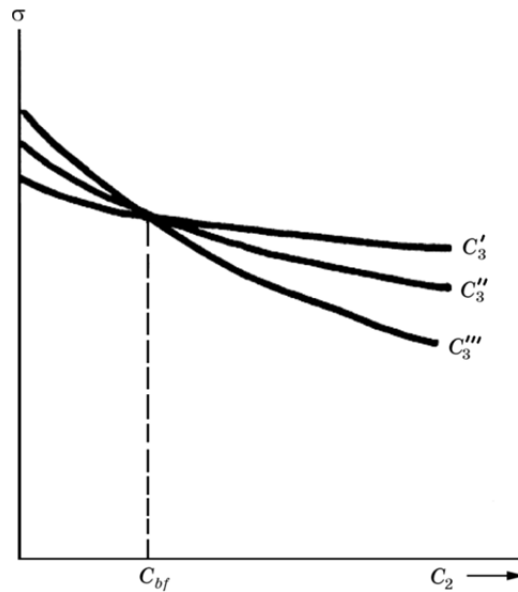


Рис.1. Вплив концентрації домішок горофільного елемента ($C_3' < C_3'' < C_3'''$) на поверхневу енергію межі зерна (σ) [26].

(мас.) % Ті даній нерівності відповідає узагальнений статистичний момент m_s цирконію, який найбільше гальмує ріст комірок.

4. ВИСНОВКИ

Досліджено вплив домішки третього елемента (Ni, In, Ga, Mn, Co, Cr, Fe, Sn та Zr) на кінетику коміркового розпаду в стопі міді з 5,69 (4,35) ат. (мас.) % титану за температури 873 К.

Показано, що нікель та індій пришвидшують ріст комірок, а решта гальмує його.

Характер впливу легування досліджуваного стопу на кінетику коміркового розпаду проаналізовано на основі теоретичних уявлень щодо узагальненого статистичного моменту атомів складових елементів стопу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. Н. Лариков, *Вопросы физики металлов и металловедения*, вып. 10: 121 (1959).
2. Л. Н. Лариков, М. Н. Беякова, Б. Бейер, И. Виттинг, Р. Ратке, О. А. Шматко, *Труды симпозиума «Проблемы физики твердого тела и материаловедения» (10–20 апреля 1976)* (Москва: Наука: 1976), с. 159.

3. Л. Н. Лариков, О. А. Шматко, *Ячеистый распад пересыщенных твердых растворов* (Киев: Наукова думка: 1976)
4. В. Ф. Суховаров, *Прерывистое выделение фаз в сплавах* (Новосибирск: Наука: 1983).
5. P. Zięba, *Local Characterization of Chemistry and Kinetics in Discontinuous Solid State Reactions* (Cracow: Institute of Metallurgy and Material Science, Polish Academy of Sciences: 2001).
6. H. I. Aaronson and Y. C. Liu, *Scr. Met.*, **2**, No. 1: 1 (1968).
7. С. Н. Задумкин, *ЖЭТФ*, **24**, № 5: 615 (1953).
8. А. М. Корольков, *Изв. АН СССР. Отд. техн. наук*, **2**: 35 (1956).
9. В. Н. Чувильдеев, *ФММ*, **81**, № 2: 5 (1996); idem, **81**, № 4: 53 (1996).
10. В. Н. Чувильдеев, *ФММ*, **81**, № 5: 5 (1996).
11. Е. С. Смирнова, В. Н. Чувильдеев, *ФММ*, **88**: 74 (1999).
12. Г. Шульце, *Металлофизика* (Москва: Мир: 1971).
13. М. Хансен, К. Андерко, *Структура двойных сплавов* (Москва: Металлургиздат: 1962), т. 1.
14. *Metals Handbook. Metallography, Structures and Phase Diagrams* (Metals Park, Ohio: ASM: 1973).
15. К. Дж. Смитлз, *Металлы: Справочник* (Москва: Металлургия: 1980).
16. В. Е. Панин, М. Ф. Жоровков, И. И. Наумов, Е. В. Чулков, С. Г. Псахье, *Материалы I Всесоюзной школы по диаграммам состояния в материаловедении (Кацивели, 1978)* (Киев: 1979), с. 144.
17. Л. Н. Лариков, О. А. Шматко, *Республиканский межведомственный сборник «Металлофизика»*, вып. 37: 63 (1971).
18. W. C. Knodle and J. Koehler, *J. Nucl. Mater.*, **69**, Nos. 1–2: 620 (1978).
19. Х. Г. Тхагапсоев, *Металлофизика* (Рукопись деп. № 4012-83, 15 с.) (1983).
20. Х. Г. Тхагапсоев, *Изв. АН СССР. Металлы*, № 2: 143 (1984).
21. Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко, *Конфигурационная модель вещества* (Киев: Наукова думка: 1971).
22. А. Г. Рахштадт, О. М. Ховова, В. А. Беляева, *ФММ*, **52**, № 5: 1017 (1981).
23. Т. Ф. Елсукова, Н. И. Афанасьев, Н. Т. Мацкевич, *Тез. докл. III Всесоюзного совещания по старению сплавов «Атомно-кристаллическая структура начальных стадий старения в металлических сплавах» (26 февраля–2 марта 1979 г., Свердловск)* (Свердловск: ИФМ УНЦ АН СССР: 1979).
24. Н. И. Афанасьев, Т. Ф. Елсукова *ФММ*, **57**, № 1: 96 (1984).
25. С. Н. Задумкин, *Журнал неорганической химии*, **5**, № 8: 1892 (1960).
26. В. К. Семенченко, *Поверхностные явления в металлах и сплавах* (Москва: Госиздат: 1957).
27. П. Гамбош, *Статистическая теория атома и ее применения* (Москва: ИЛ: 1951).

REFERENCES

1. L. N. Larikov, *Voprosy Fiziki Metallov i Metallovedeniya*, Iss. 10: 121 (1959) (in Russian).
2. L. N. Larikov, M. N. Belyakova, B. Beyer, I. Vitting, R. Rattke, and O. A. Shmatko, *Trudy Simpoziuma 'Problemy Fiziki Tverdogo Tela i Materialovedeniya' (April 10–20, 1976)* (Moscow: Nauka: 1976), p. 159 (in Russian).

3. L. N. Larikov and O. A. Shmatko, *Yacheistyy Raspad Peresyshchennykh Tvyordykh Rastvorov* (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
4. V. F. Sukhovarov, *Preryvistoe Vydelenie Faz v Splavakh* (Novosibirsk: Nauka: 1983) (in Russian).
5. P. Zięba, *Local Characterization of Chemistry and Kinetics in Discontinuous Solid State Reactions* (Cracow: Institute of Metallurgy and Material Science, Polish Academy of Sciences: 2001).
6. H. I. Aaronson and Y. C. Liu, *Scr. Met.*, **2**, No. 1: 1 (1968).
7. S. N. Zadumkin, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **24**, No. 5: 615 (1953) (in Russian).
8. A. M. Korol'kov, *Izv. AN SSSR. Otd. Tekhn. Nauk*, **2**: 35 (1956) (in Russian).
9. V. N. Chuvil'deyev, *Fiz. Met. Metalloved.*, **81**, No. 2: 5 (1996); idem, **81**, No. 4: 53 (1996) (in Russian).
10. V. N. Chuvil'deev, *Fiz. Met. Metalloved.*, **81**, No. 5: 5 (1996) (in Russian).
11. E. S. Smirnova and V. N. Chuvil'deev, *Fiz. Met. Metalloved.*, **88**: 74 (1999) (in Russian).
12. G. E. R. Schulze, *Metallphysik* (Berlin: Akademie-Verlag: 1967) (in German).
13. M. Hansen and K. Anderko, *Constitution of Binary Alloys* (New York: McGraw-Hill: 1958), vol. 1.
14. *Metals Handbook. Metallography, Structures and Phase Diagrams* (Metals Park, Ohio: ASM: 1973).
15. C. J. Smithells, *Metals: Reference Book* (London–Boston: Butterworths: 1976).
16. V. E. Panin, M. F. Zhorovkov, I. I. Naumov, E. V. Chulkov, and S. G. Psakh'ye, *Materialy I Vsesoyuznoy Shkoly po Diagrammam Sostoyaniya v Materialovedenii (Katsiveli, 1978)* (Kiev: 1979), p. 144 (in Russian).
17. L. N. Larikov and O. A. Shmatko, *Metallofizika*, Iss. 37: 63 (1971) (in Russian).
18. W. C. Knodle and J. Koehler, *J. Nucl. Mater.*, **69**, Nos. 1–2: 620 (1978).
19. Kh. G. Thagapsoev, *Metallofizika* (Deposit Manuscript No. 4012-83, 15 p.) (1983) (in Russian).
20. Kh. G. Thagapsoev, *Izv. AN SSSR. Metally*, No. 2: 143 (1984) (in Russian).
21. G. V. Samsonov, I. F. Pryadko, and L. F. Pryadko, *Konfiguratsionnaya Model' Veshchestva* (Kiev: Naukova Dumka: 1971) (in Russian).
22. A. G. Rakhshadt, O. M. Khovova, and V. A. Belyaeva, *Fiz. Met. Metalloved.*, **52**, No. 5: 1017 (1981) (in Russian).
23. T. F. Elsukova, N. I. Afanas'ev, and N. T. Matskevich, *Tezisy III Vsesoyuznogo Soveshchaniya po Stareniyu Splavov 'Atomno-Kristallicheskaya Struktura Nachal'nykh Stadiy Stareniya v Metallicheskih Splavakh' (February 26–March 2, 1979, Sverdlovsk)* (Sverdlovsk: IFM UNTs AN SSSR: 1979), p. 31 (in Russian).
24. N. I. Afanas'ev and T. F. Elsukova, *Fiz. Met. Metalloved.*, **57**, No. 1: 96 (1984) (in Russian).
25. S. N. Zadumkin, *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii*, **5**, No. 8: 1892 (1960) (in Russian).
26. V. K. Semenchenko, *Poverkhnostnye Yavleniya v Metallakh i Splavakh* (Moscow: Gosizdat: 1957) (in Russian).
27. P. Gambosh, *Statistical Theory of the Atom and Its Applications* (Moscow: IL: 1951) (Russian translation).