

Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 3 (43). С. 64-70
Vestnik Kurganskoy GSNA. 2022; (3-43): 64-70

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

DOI: 10.52463/22274227_2022_43_64

УДК 669.018.95

EDN: YNKWEL

Код ВАК 4.3.1

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ: ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЬ-ТИТАН-АЗОТ И НИКЕЛЬ-ХРОМ-ТИТАН-АЗОТ

Леонид Михайлович Савиных¹, Татьяна Александровна Дудорова², Станислав Юрьевич Помялов³, Татьяна Владиславовна Корнюшева⁴

^{1, 2, 3, 4}Курганский государственный университет, Курган, Россия

¹savinih_LM.polytech@kgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1335-2980>

²dudorovatan@yandex.ru

³pomialov_45@mail.ru

⁴kornuseva@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования. Сельскохозяйственные машины работают в трудных условиях. Пыль, грязь, снег, дождь, попадая в трущиеся узлы, вызывают усиленный механический износ. В результате этих причин детали и целые узлы теряют свою первоначальную прочность и преждевременно выходят из строя, чем наносится большой материальный ущерб сельхоз производителям. **Методика.** Поэтому важным вопросом является разработка и последующее изготовление деталей сельскохозяйственной техники, обладающих комплексом свойств: высокой твердостью, прочностью, износостойкостью и способностью противостоять абразивному износу и при этом не быть дорогостоящими в изготовлении. Изготовление деталей из металлических порошков, а точнее из карбидосталей, вместо применяемых материалов является актуальной задачей и перспективной. Карбидосталью называют материалы, состоящие из легированных сталей или металлических порошков и карбидов с массовой долей от 20 до 70 %. В качестве твердой составляющей для карбидосталей применяют карбид титана, как наиболее распространенный и наиболее дешевый. По своим механическим свойствам карбидостали занимают промежуточное место между твердыми сплавами и сталями. Порошковые детали (карбидостали) получают следующими способами: 1) замешиванием различных металлических порошков совместно с пластификатором и последующим прессованием в пресс-форме; 2) получение порошковых деталей пропиткой. **Результаты.** Исследован процесс формирования карбидного каркаса обеспечивающий получение прочных карбидных прессовок с сохранением размеров в процессе пропитки при получении готового изделия. Полученные детали имели высокие механические свойства. **Научная новизна.** Впервые получены изделия пропиткой отходами стали определенного химического состава, обеспечивающими свободное отделение оставшегося металла после пропитки и сохраняющие форму детали. Проведенный термодинамический анализ позволяет определить необходимое содержание легирующих элементов стали, применяемых для изготовления детали.

Ключевые слова: спекание, пропитка, металлические порошки, отходы металла, прессовка, изделие, прессование, плотность, карбидостали.

Для цитирования: Савиных Л.М., Дудорова Т.А., Помялов С.Ю., Корнюшева Т.В. Термодинамический анализ систем: железо-никель-титан-азот и никель-хром-титан-азот // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 3 (43). С. 64-70. https://doi.org/10.52463/22274227_2022_43_64

Scientific article

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE SYSTEMS: FERRUM-NICKEL-TITANIUM-NITROGEN AND NICKEL-CHROME-TITANIUM-NITROGEN

Leonid M. Savinykh¹, Tatyana A. Dudorova², Stanislav Yu. Pomyalov³, Tatyana V. Kornysheva⁴

^{1, 2, 3, 4}Kurgan State University, Kurgan, Russia

¹savinih_LM.polytech@kgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1335-2980>

²dudorovatan@yandex.ru

³pomialov_45@mail.ru

⁴kornuseva@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study. Agricultural machinery operates in difficult conditions. Dust, dirt, snow, rain getting into the friction surface units cause increased mechanical wear. As a result of these reasons, parts and entire units lose their initial strength and fail prematurely, causing great material damage to agricultural producers. **Methodology.** Therefore, an important issue is the development and subsequent manufacture of agricultural machinery parts with a complex of properties: high hardness, strength, wear resistance and the ability to resist abrasive wear and at the same time not be expensive to manufacture. The manufacture of parts from metal powders, or rather from carbido-steels, is an urgent and promising task. Carbido-steels are materials consisting of alloyed steels or metal powders and carbides with a weight fraction of 20 to 70 %. Titanium carbide is used as a solid component for carbide steels, being the most common and cheapest. According to their mechanical properties, carbide steels occupy an intermediate place between hard alloys and steels. Powder parts (of carbido-steels) are prepared by the following methods: 1) mixing various metal powders together with a plasticizer and then being pressed in a mold; 2) fabricating powder parts by impregnation. **Results.** The process of carbide carcass formation is investigated to provide manufacturing strong carbide compacts preserving the dimensions during impregnation when obtaining the finished product. The obtained parts had high mechanical properties. **Scientific novelty.** For the first time, the parts were obtained by impregnation with steel wastes of a certain chemical composition, which ensure free separation of the remaining metal

after impregnation and keep the shape of the parts. The thermodynamic analysis performed makes it possible to determine the required content of alloying steel elements used to manufacture the part.

Keywords: sintering, impregnation, metal powders, metal waste, compact, part, pressing, density, carbido-steels.

For citation: Savinykh L.M., Dudorova T.A., Pomyalov S.Yu., Kornysheva T.V. Thermodynamic analysis of the systems: ferrum-nickel-titanium-nitrogen and nickel-chrome-titanium-nitrogen. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2022; (3-43): 64-70. https://doi.org/10.52463/22274227_2022_43_64. (In Russ).

Введение. Концентрации титана, обеспечивающие образования нитридов титана в расплаве железо-никель-титан-азот, определялись равновесными параметрами реакции [1-2].

$$Ti_{Fe-Ni} + \frac{1}{2} N_{2газ} = TiN_{TB}; \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{1}{f_{Ti}^{Fe-Ni} \cdot X_{Ti} \cdot P_{N_2}^{0,5}}. \quad (2)$$

Учитывая ($\Delta G_T^0 = -RT \ln K$) уравнение (2) можно представить в виде:

$$\ln P_{N_2} = \frac{G_T^0 - RT \ln X_{Ti} - RT \ln f_{Ti}^{Fe-Ni}}{0,5RT}. \quad (3)$$

После подстановки в уравнение (3) по ΔG_T^0 и f_{Ti}^{Fe-Ni} по данным работ [3] получаем:

$$\ln P_{N_2} = \frac{-36831 + W_1 74T + (13,89X_{Ni}^2 + 4,39X_{Fe}^2) \cdot 10^3}{T} + \frac{(10,44X_{Ni}X_{Fe} + 7,83X_{Ni} \cdot X_{Fe}^2) \cdot 10^3}{T} - 2 \lg X_{Ti}. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) совместно с уравнением

$$X_{Fe} + X_{Ni} + X_{Ti} = 1 \quad (5)$$

можно найти парциальное давление азота, обеспечивающее выделение нитрида в сплавах Fe-Ni. Пусть

$$(13,89 \cdot X_{Ni}^2 + 4,39X_{Fe}^2) \cdot 10^3 = a;$$

$$(10,44X_{Ni} \cdot X_{Fe} + 7,83X_{Ni} \cdot X_{Fe}^2) \cdot 10^3 = \epsilon, \text{ тогда}$$

$$\lg P_{N_2} = \frac{-36831 + 10,74T + a + \epsilon}{T} - 2 \lg X_{Ti}. \quad (6)$$

Методика. Весь процесс карбидостали можно разбить на три основных этапа: подготовка карбидного каркаса, пропитка его стальным расплавом, термическая обработка полученной карбидостали.

В качестве основного износостойкого материала был выбран карбид титана, а в качестве стальной связки нержавеющей хромо-никелевая аустенитная сталь 12X18H10T.

Данный способ пропитки неспеченного кар-

бидного каркаса отходами сталей, которые с одной стороны, устраняет разъедание каркаса, а с другой обеспечивает свободное удаление остатков пропитываемого материала с поверхности готового изделия требует достаточно корректных данных об условиях выделения твердых частиц нитрида титана из жидких сплавов на основе железа и никеля. Для получения таких данных был сделан термодинамический анализ систем, результаты которого достаточно точно указывают условия выделения нитрида титана из расплавов разного химического состава.

Результаты. Равновесные парциальные давления азота, обеспечивающие образование нитрида титана в жидких сплавах железо-никель-титан разного состава при температурах 1723-1773 К, приведены в таблицах 1 и 2.

Сделанные расчеты показывают, что выделение нитрида титана из сплавов железо-никель, содержащих больше 10 % никеля, происходит при значительных парциальных давлениях азота, причем, с повышением содержания никеля в расплаве парциальное давление азота значительно возрастает. В связи с этим, для обеспечения выделения нитрида титана из жидких сплавов железо-никель необходимо производить пропитку карбидного каркаса в атмосфере азота. После подстановки в уравнение (6) $P_{N_2} = 1$ ат. можно найти концентрации титана, обеспечивающие выделение нитридов из сплавов железо-никель различного состава в атмосфере азота. Расчет равновесных концентраций титана при 1723-1773 К приведен в таблице 3. На рисунке показаны равновесные концентрации титана, обеспечивающие образование нитридов в зависимости от содержания никеля в расплавах Fe-Ni, при 1723, 1743, 1773 К и $P_{N_2} = 1$ ат.

Равновесное процентное содержание титана в сплавах [Ti, %] рассчитывали из известного соотношения:

$$X_{Ti} = \frac{\frac{[Ti, \%]}{48}}{\frac{[Ti, \%]}{48} + \frac{[Ni, \%]}{59} + \frac{[Fe, \%]}{56}}. \quad (7)$$

После преобразования (7) получим

$$[Ti, \%] = \frac{(0,8571[Fe, \%] + 0,8136[Ni, \%]) \cdot X_{Ti}}{1 - X_{Ti}}. \quad (8)$$

Таблица 1 – Равновесные парциальные давления азота, обеспечивающие образование нитрида титана в системе железо-никель при 1723 К

Состав сплава, %			Состав сплава, молярные доли			a	e	$-2lgX_{Ti}$	lgP_{N_2}	$P_{N_2}, \text{ атм}$
Fe	Ni	Ti	X_{Fe}	X_{Ni}	X_{Ti}					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
89,9	10,0	0,1	0,9032	0,0956	0,0012	3708	1512	5,8416	-1,7649	0,01712
89,5	10,0	0,5	0,8986	0,0955	0,0060	3631	1500	4,4436	-3,2146	0,00061
89,0	10,0	1,0	0,8828	0,0955	0,0117	3626	1486	3,8636	-3,8056	0,00015
79,9	20,0	0,1	0,8067	0,1921	0,0012	3369	2596	5,8416	-1,3325	0,04651
79,5	20,0	0,5	0,8021	0,1920	0,0059	3337	2575	4,4582	-2,7467	0,00179
79,0	20,0	1,0	0,7965	0,1918	0,0117	3295	2547	3,8490	-3,3965	0,00040
59,9	40,0	0,1	0,6108	0,3860	0,0012	3729	3608	5,8416	-0,5362	0,29090
59,5	40,0	0,5	0,6063	0,3878	0,0059	3712	3571	4,4582	-1,9509	0,01121
59,0	40,0	1,0	0,6007	0,3874	0,0118	3672	3527	3,8562	-2,6017	0,00250
49,9	50,0	0,1	0,5113	0,4875	0,0012	4449	3600	5,8416	-0,1230	0,75280
49,5	50,0	0,5	0,5069	0,4872	-0,0059	4424	3558	4,4582	-1,5453	0,02849
49,0	50,0	1,0	0,5013	0,4867	0,0119	4394	3508	3,8490	-2,2009	0,01712
39,9	60,0	0,1	0,4109	0,5879	0,0012	5542	3299	5,8416	0,3367	2,17100
39,5	60,0	0,5	0,4065	0,5875	0,0060	5520	3253	4,4436	-1,1008	0,08000
39,0	60,0	1,0	0,4010	0,5370	0,0120	5492	3196	3,8416	-1,7521	0,01770
19,9	80,0	0,1	0,2070	0,7918	0,0012	8896	1977	5,8416	1,5160	32,81000
19,5	80,0	0,5	0,2027	0,7912	0,0060	8875	1929	4,4436	0,0780	1,19700
19,0	80,0	1,0	0,1973	0,7905	0,0121	8851	1869	3,8344	-0,5800	0,26300
0	99,9	0,1	–	0,9988	0,0012	13857	–	5,8416	3,2479	1770,00
0	99,5	0,5	–	0,9939	0,0061	13721	–	4,4294	1,7567	57,11
0	99,0	1,0	–	0,9877	0,0122	13550	–	3,8272	1,0553	11,36

Таблица 2 – Равновесное парциальное давление азота, обеспечивающее образование нитрида титана в системе железо-никель-титан при 1773 К

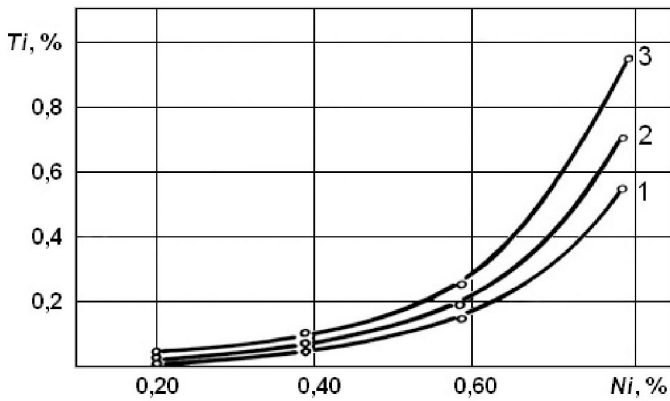
Состав сплава, %			Молярные доли			a	e	$-2lgX_{Ti}$	lgP_{N_2}	$P_{N_2}, \text{ атм}$
Fe	Ni	Ti	X_{Fe}	X_{Ni}	X_{Ti}					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
89,9	10,0	0,1	0,9032	0,0956	0,0012	3708	1512	5,8416	-1,2413	0,05737
89,5	10,0	0,5	0,8986	0,0955	0,0060	3631	1500	4,4436	-2,6895	0,00205
89,0	10,0	1,0	0,8828	0,0955	0,0117	3636	1486	3,8636	-3,2802	0,00052
79,9	20,0	0,1	0,8067	0,1921	0,0012	3369	2596	5,8416	-0,8212	0,15090
79,5	20,0	0,5	0,8021	0,1920	0,0059	3337	2575	4,4582	-2,2344	0,00583
79,0	20,0	1,0	0,7965	0,1918	0,0117	3295	2547	3,8490	-2,8830	0,00131
59,9	40,0	0,1	0,6108	0,3860	0,0012	3729	3608	5,8416	-0,0473	0,89680
59,5	40,0	0,5	0,6063	0,3878	0,0059	3712	3571	4,4582	-1,4611	0,00346
59,0	40,0	1,0	0,6007	0,3874	0,0118	3672	3527	3,8562	-2,1105	0,00775
49,9	50,0	0,1	0,5113	0,4875	0,0012	4449	3600	5,8416	0,3543	2,26100
49,5	50,0	0,5	0,5069	0,4872	0,0059	4424	3558	4,4582	-1,0669	0,08573
49,0	50,0	1,0	0,5013	0,4867	0,0119	4394	3508	3,8490	-1,7212	0,01900
39,9	60,0	0,1	0,4109	0,5879	0,0012	5542	3299	5,8416	0,8010	6,32400
39,5	60,0	0,5	0,4065	0,5875	0,0060	5520	3253	4,4436	-0,6354	0,23150
39,0	60,0	1,0	0,4010	0,5370	0,0120	5492	3196	3,8416	-1,2853	0,05184
19,9	80,0	0,1	0,2070	0,7918	0,0012	8896	1977	5,8416	1,9471	88,53000
19,5	80,0	0,5	0,2027	0,7912	0,0060	8875	1929	4,4436	0,5102	3,23800
19,0	80,0	1,0	0,1973	0,7905	0,0121	8851	1869	3,8344	0,1464	1,38500
–	99,9	0,1	–	0,9988	0,0012	13857	–	5,8416	3,6301	4275,00
–	99,5	0,5	–	0,9939	0,0060	13721	–	4,4294	2,1410	138,300
–	99,9	1,0	–	0,9877	0,0122	13550	–	3,8272	1,4425	27,7000

Таблица 3 – Равновесные концентрации титана, обеспечивающие выделение нитрида из сплавов железо-никель в атмосфере азота

T, K	Состав сплава, %		Состав сплава, молярные доли		a	ε	lgX _{Ti}	X _{Ti}	1 - X _{Ti}	[Ti, %]
	Fe	Ni	X _{Fe}	X _{Ni}						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1723	80,0	20,0	0,8079	0,1921	3369	2596	-3,5871	0,00026	0,99974	0,022
1723	60,0	40,0	0,6140	0,3860	3729	3608	-3,1889	0,00065	0,99935	0,055
1723	40,0	60,0	0,4121	0,5879	5542	3299	-2,7525	0,00177	0,99823	0,147
1723	20,0	80,0	0,2082	0,7918	8896	1977	-2,1628	0,00672	0,99328	0,556
1723	–	100,0	–	1,0000	13857	–	-1,2969	0,05048	0,94952	4,325
1743	80,0	20,0	0,8079	0,1921	3369	2596	-3,4842	0,00033	-0,99967	0,028
1743	60,0	40,0	0,6140	0,3860	3729	3608	-3,0906	0,00082	0,99918	0,069
1743	40,0	60,0	0,4121	0,5879	5542	3299	-2,6592	0,00219	0,99781	0,182
1743	20,0	80,0	0,2082	0,7918	8896	1977	-2,0763	0,00839	0,99161	0,696
1743	–	100,0	–	1,0000	13857	–	-1,2203	0,06021	0,93979	5,215
1773	80,0	20,0	0,8079	0,1921	3369	2596	-3,3313	0,00047	0,99953	0,040
1773	60,0	40,0	0,6140	0,3860	3729	3608	-2,9444	0,00114	0,99886	0,096
1773	40,0	60,0	0,4121	0,5879	5542	3299	-2,5203	0,00302	0,99698	0,252
1773	20,0	80,0	0,2082	0,7918	8896	1977	-1,9472	0,01129	0,98871	0,939
1773	–	100,0	–	1,0000	13857	–	-1,1057	0,07839	0,92161	6,920

Если X_{Ti} << 1,0 то с точностью до 5 % можно пользоваться соотношением

$$[Ti, \%] \sim (0,8571[Fe, \%] + 0,8136[Ni, \%]) \cdot X_{Ti}$$

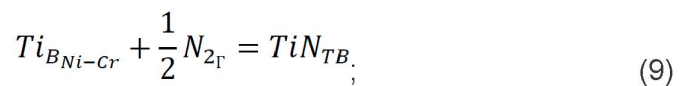


1 – 1723 К; 2 – 1743 К; 3 – 1773 К.

Рисунок – Зависимость равновесных концентраций титана от содержания [Ni, %]_{Fe} и температуры

Термодинамический анализ системы никель-хром-титан-азот. Пропитка карбидного каркаса никель-хромовыми жаропрочными сплавами представляет значительный интерес в связи с хорошей смачиваемостью никелем карбида титана. Условие трехфазного равновесия расплав-нитрид-газ анализировалось с использованием методики и данных, приведенных в работе [3].

Взаимодействие азота с растворенным в сплаве титаном описывается реакцией



$$K_4 = \frac{1}{[Ti, \%] \cdot f_{Ti}^{Ni-Cr} \cdot P_{N_2}^{0,5}}; \tag{10}$$

$$\lg K_4 = \frac{11470 + 10757X_{Cr}}{T} - 7,28. \tag{11}$$

Влияние никеля и хрома на коэффициент активности титана определяется соотношением [4].

$$\lg f_{Ti}^{Ni-Cr} = X_{Ti} \left(\frac{6945X_{Ni} - 2506X_{Cr}}{T} \right). \tag{12}$$

Решая совместно (10), (11) и (12), получим

$$\lg P_{N_2} = \frac{-22940 + 14,56T - 21514X_{Cr} - 13890X_{Ti}X_{Ni} + 5012X_{Ti}X_{Cr}}{T} - 2\lg[Ti, \%]. \tag{13}$$

Принимая a = -22940 + 14,56T; ε = 21514X_{Cr}; c = 13890X_{Ti}X_{Cr}; d = 5012X_{Ti}X_{Cr}, имеем

$$\lg P_{N_2} = \frac{a - b - c - d}{T} - 2\lg[Ti, \%] \tag{14}$$

В таблицах 4-6 приведен расчет равновесных парциальных давлений азота в газовой фазе, обеспечивающих выделение нитридов из жидких сплавов никель-хром с содержанием хрома 5-20 % и разным содержанием титана при 1723-1773 К.

Полученные данные показывают, что при низких содержаниях титана в этих расплавах и парциальных давлениях азота, равных или меньших 1 ат., нитриды выделяться не будут. С увеличением содержания хрома в сплавах падает равновесное парциальное давление азота, обеспечивающее выделение нитридов. Так, при содержании хрома 15-20 % даже 0,5 % титана в сплаве обеспечивает выделение нитридов при пропитке карбидного каркаса в атмосфере азота ($P_{N_2} = 1,0$ ат.).

Выделение нитридов из расплава, содержащего 5-10 % хрома и давлении азота 1 ат., обеспечивает содержание титана в сплавах более 1,0-2,0 %.

Следует отметить довольно значительное влияние температуры на образование нитрида титана в жидких никельхромовых сплавах [5]. Так, например, если в сплавах никель – 5 % хрома при 1723-1743 К 2,0 % титана обеспечивает образование нитридов при пропитке карбидного каркаса в атмосфере азота ($P_{N_2} = 1$ ат.), то при 1773 К такое содержание титана обеспечить образование нитридов в расплаве не может.

Для практического применения полученных в результате термодинамического анализа данных необходимо еще определить минимальное содержание титана в никельхромовых сплавах с разной концентрацией хрома, которое обеспечивает выделение нитридов из расплава при пропитке карбидного каркаса в атмосфере азота ($P_{N_2} = 1,0$ ат.). Для этой цели можно сделать приближенный термодинамический расчет.

Таблица 4 – Равновесные парциальные давления азота в газовой фазе, обеспечивающие выделение нитрида титана в никельхромовых расплавах при 1723 К

Состав сплава, %			Состав сплава, молярные доли			a	в	c	d	2lg[Ti, %]	lgP _{N₂}	P _{N₂} атм.
Ni	Cr	Ti	X _{Ni}	X _{Cr}	X _{Ti}							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
94,8	5	0,2	0,9412	0,0563	0,0025	2147	1211	32,68.32	0,7052	-1,3979	1,9226	83,62
94,5	5	0,5	0,9377	0,0562	0,0060	2147	1209	78,1479	1,6900	-0,6021	1,1021	12,59
94,2	5	0,8	0,9340	0,0562	0,0098	2147	1209	127,1379	2,7602	-0,1938	0,6660	4,63
94,0	5	1,0	0,9316	0,0562	-0,0122	2147	1209	157,8668	3,4362	0,0000	0,4548	2,85
93,5	5	1,5	0,9256	0,0561	0,0183	2147	1207	235,2755	5,1455	0,3522	0,10568	1,07
93,0	5	2,0	0,9196	0,0561	0,0243	2147	1207	310,3900	6,8325	0,6020	-0,2326	0,59
89,8	10	0,2	0,8857	0,1119	0,0024	2147	2407	29,5257	1,3460	-1,3979	1,2062	16,08
89,5	10	0,5	0,8822	0,1118	0,0060	2147	2405	73,5225	3,3620	-0,6021	0,4116	2,51
89,2	10	0,8	0,8786	0,1117	0,0097	2147	2403	118,3764	5,4345	-0,1938	-0,0203	0,95
89,0	10	1,0	0,8762	0,1117	0,0121	2147	2403	147,2621	6,7740	0,0000	-0,2301	0,59
84,8	15	0,2	0,8308	0,1668	0,0024	2147	3588	27,6955	2,0064	-1,3979	0,5467	3,52
84,5	15	0,5	0,8274	0,1666	0,0060	2147	3584	68,9555	5,0100	-0,6021	-0,2690	0,54
84,2	15	0,8	0,8238	0,1665	0,0097	2147	3582	110,9930	8,0946	-0,1938	-0,6999	0,20
84,0	15	1,0	0,8215	0,1665	0,0120	2147	3582	136,9276	10,0140	0,0000	-0,9065	0,15
79,8	20	0,2	0,7767	0,2209	0,0024	2147	4752	25,8971	2,6572	-1,3979	-0,1275	0,94
79,5	20	0,5	0,7733	0,2207	0,0060	2147	4748	64,4682	6,6369	-0,6021	-0,9410	0,11
79,2	20	0,8	0,7698	0,2206	0,0096	2147	4746	102,6482	10,6142	-0,1938	-1,3681	0,04
79,0	20	1,0	0,7676	0,2205	0,0119	2147	4744	126,8774	13,1512	0,0000	-1,5793	0,03

Из уравнения (14) и таблиц 4-6 следует, что члены *c* и *d* слабо влияют на равновесное парциальное давление азота. Поэтому

$$lgP_{N_2} \approx \frac{-23040 + 14,56T - 21514X_{Cr}}{T} - 2lg[Ti, \%], \quad (15)$$

При $P_{N_2} = 1$ и $lgP_{N_2} = 0$ получим

$$lg[Ti, \%] = \frac{-23040 + 14,56T - 21514X_{Cr}}{T} \quad (16)$$

Уравнение (16) было использовано для приближенного подсчета равновесной концентрации титана в никельхромовых сплавах, обеспечивающей выделение нитрида при 1723-1773 К (таблица 7).

Таблица 5 – Равновесные парциальные давления азота в газовой фазе, обеспечивающие выделение нитрида титана в никельхромовых расплавах при 1743 К

Состав сплава, %			Состав сплава, молярные доли			a	ε	c	d	2lg[Tl, %]	lgP _{N₂}	P _{N₂'} атм.
Ni	Cr	Ti	X _{Ni}	X _{Cr}	X _{Ti}							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
94,8	5	0,2	0,9412	0,0563	0,0025	2438	1211	32,6832	0,7052	-1,3979	2,0835	121,20
94,6	5	0,5	0,9377	0,0562	0,0060	2438	1209	78,1479	1,6900	-0,6021	1,2633	18,34
94,2	5	0,8	0,9340	0,0562	0,0098	2438	1209	127,1379	2,7602	-0,1938	0,8275	6,72
94,0	5	1,0	0,9316	0,0562	0,0122	2438	1209	157,8668	3,4362	0,0000	0,6117	4,09
93,5	5	1,5	0,9250	0,0561	0,0183	2438	1207	235,2755	5,1455	0,3522	0,2220	1,67
93,0	5	2,0	0,9196	0,0561	0,0243	2438	1207	310,3900	6,8325	0,6020	-0,0699	0,85
89,8	10	0,2	0,8857	0,1119	0,0024	2438	2407	29,5257	1,3460	-1,3979	1,3995	25,09
89,5	10	0,5	0,8822	0,1118	0,0060	2438	2405	73,5225	3,3620	-0,6021	0,5808	3,81
89,2	10	0,8	0,8786	0,1117	0,0097	2438	2403	118,3764	5,4345	-0,1938	0,1491	1,41
89,0	10	1,0	0,8762	0,1117	0,0121	2438	2403	147,2621	6,7740	0,0000	-0,0605	0,87
84,8	15	0,2	0,8308	0,1668	0,0024	2438	3588	27,6955	2,0064	-1,3979	0,7234	5,29
84,5	15	0,5	0,8274	0,1666	0,0060	2438	3584	68,9555	5,0100	-0,6021	-0,0921	0,81
84,2	15	0,8	0,8238	0,1665	0,0097	2438	3582	110,9930	8,0946	-0,1938	-0,5216	0,30
84,0	15	1,0	0,8215	0,1665	0,0120	2438	3582	136,9276	10,0140	0,0000	-0,7291	0,19
79,8	20	0,2	0,7767	0,2209	0,0024	2438	4752	25,8971	2,6572	-1,3979	0,0570	1,14
79,5	20	0,5	0,7733	0,2207	0,0060	2438	4748	64,4682	6,6369	-0,6021	-0,7564	0,18
79,2	20	0,8	0,7698	0,2206	0,0096	2438	4746	102,6482	10,6142	-0,1938	-1,1832	0,07
79,0	20	1,0	0,7676	0,2205	0,0119	2438	4744	126,8774	13,1512	0,0000	-1,3883	0,04

Таблица 6 – Равновесные парциальные давления азота в газовой фазе, обеспечивающие выделение нитрида титана в никельхромовых расплавах при 1773 К

Состав сплава, %			Состав сплава, молярные доли			a	ε	c	d	2lg[Tl, %]	lgP _{N₂}	P _{N₂'} атм.
Ni	Cr	Ti	X _{Ni}	X _{Cr}	X _{Ti}							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
94,8	5	0,2	0,9412	0,0563	0,0025	2875	1211	32,6832	0,7052	-1,3979	2,3183	208,10
94,5	5	0,5	0,9377	0,0562	0,0060	2875	1209	78,1479	1,6900	-0,6021	1,4986	31,52
94,2	5	0,8	0,9340	0,0562	0,0098	2875	1209	127,1379	2,7602	-0,1938	1,0633	11,57
94,0	5	1,0	0,9316	0,0562	0,0122	2875	1209	157,8668	3,4362	0,1001	0,8525	7,12
93,5	5	1,5	0,9250	0,0561	0,0183	2875	1207	235,2755	5,1455	0,3522	0,5152	3,27
93,0	5	2,0	0,9196	0,0561	0,0243	2875	1207	310,3900	6,8325	0,6020	0,1678	1,47
89,8	10	0,2	0,8857	0,1119	0,0024	2875	2407	29,5257	1,3460	-1,3975	1,6460	43,66
89,5	10	0,5	0,8822	0,1118	0,0060	2875	2405	73,5225	3,3620	-0,6021	0,8276	6,72
89,2	10	0,8	0,8786	0,1117	0,0097	2875	2403	118,3764	5,4345	-0,1938	0,3963	2,49
89,0	10	1,0	0,8762	0,1117	0,0121	2875	2403	147,2621	6,7740	0,0000	0,1870	1,54
84,8	15	0,2	0,8308	0,1668	0,0024	2875	3588	27,6955	2,0064	-1,3979	0,9813	9,55
84,5	15	0,5	0,8274	0,1666	0,0060	2875	3584	68,9555	5,0100	-0,6021	0,1661	1,47
84,2	15	0,8	0,8238	0,1665	0,0097	2875	3582	110,9930	8,0946	-0,1938	-0,2630	0,55
84,0	15	1,0	0,8215	0,1665	0,0120	2875	3582	136,9276	10,0140	0,0000	-0,4703	0,34
79,8	20	0,2	0,7767	0,2209	0,0024	2875	4752	25,8971	2,6572	-1,3979	0,3261	2,12
79,5	20	0,5	0,7733	0,2207	0,0060	2875	4748	64,4682	6,6369	-0,6021	-0,4869	0,33
79,2	20	0,8	0,7698	0,2206	0,0096	2875	4746	102,6482	10,6142	-0,1938	-0,9134	0,12
79,0	20	1,0	0,7676	0,2205	0,0119	2875	4744	126,8774	13,1512	0,0000	-1,1183	0,08

Таблица 7 – Равновесное содержание титана, обеспечивающее выделение нитрида титана в никельхромовых сплавах разного состава при 1723-1773 К

Температура, К	Состав сплава, %		Состав сплава, молярные доли		a	ε	lg[Tl, %]	[Tl, %]
	Ni	Cr	Ni	Cr				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1723	95	5	0,94	0,06	2047	1291	0,2194	1,66
1723	90	10	0,89	0,11	2047	2367	-0,0929	0,81
1723	85	15	0,83	0,17	2047	3657	-0,4672	0,34
1723	80	20	0,78	0,22	2047	4733	-0,7795	0,17
1743	95	5	0,94	0,06	2338	1291	0,3009	1,99
1743	90	10	0,89	0,11	2338	2367	-0,0083	0,98
1743	85	15	0,83	0,17	2338	3657	-0,3784	0,42
1743	80	20	0,78	0,22	2338	4733	-0,6870	0,21
1773	95	5	0,94	0,06	2775	1291	0,4185	2,62
1773	90	10	0,89	0,11	2775	2367	0,1151	1,30
1773	85	15	0,83	0,17	2775	3657	-0,2487	0,56
1773	80	20	0,78	0,22	2775	4733	-0,5522	0,28

Выводы. Результаты термодинамического анализа показывают, что в сплавы Fe-Ni с содержанием никеля до 80 % достаточно ввести 0,5-1,0 % титана, чтобы обеспечить выделение нитрида титана из расплава [4-5] при температурах 1723-1773 К. При пропитке карбидного каркаса чистым никелем в атмосфере азота для выделения нитридов необходимо, чтобы содержание титана в никеле составляло 4,0-7,0 %. Следует иметь также в виду, что с увеличением температуры пропитки содержание титана, обеспечивающее выделение нитридов из расплава возрастает.

Установлено, что в никельхромовых сплавах при 1723-1773 К хром снижает равновесное давление азота, обеспечивающее выделение нитрида. Для сплавов, содержащих менее 10 % хрома и 1,0 % титана равновесное парциальное давление азота более одной атмосферы и только при содержании хрома в сплавах более 10 %, а титана – 1,0 % равновесное парциальное давление азота становится меньше 1 ат. Следовательно, для покрытия карбидного каркаса нитридами титана его следует пропитывать никельхромовыми сплавами содержащими более 10 % хрома и 1 % титана в атмосфере азота.

Список источников

1 Гуревич Ю.Г., Фраге Н.Р. Термодинамические свойства карбонитрида титана и условия его выделения из жидкой стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 43-46.

2 Лысенкова Е.В. Повышение точности растворимости азота и нитрида титана в расплавах на основе железа, применение к сталям, легированным азотом и титаном: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02: увт. 26.02.2016. М., 2016. 75 с.

3 Александров В.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. 327 с.

4 Потехин Б.А. Металловедение: учебное пособие. Екатеринбург: ИГЛТУ, 2019. 99 с.

5 Павлов В.А., Лозовая Е.Ю., Бабенко А.А. Спецметаллургия сталей и сплавов: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2018. 168 с.

References

1 Gurevich Yu.G., Frage N.R. Termodinamicheskie svojstva karbonitrida titana i uslovija ego vydelenija iz zhidkoj stali [Thermodynamic properties of titanium carbonitride and the conditions for its extraction from liquid steel] // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy*. 1975; (2): 43-46. (In Russ).

2 Lysenkova E.V. Povyshenie tochnosti rastvorimosti azota i nitrida titana v rasplavah na osnove zheleza, primeneniye k staljam, legirovannym azotom i titanom [Improving the accuracy of the solubility of nitrogen and titanium nitride in iron-based melts, application to steels alloyed with nitrogen and titanium] [Dissertation]. Moscow; 2015. (In Russ).

3 Aleksandrov V.M. Materialovedenie i tehnologija konstrukcionnyh materialov: uchebnoe posobie. Chast' 1. Materialovedenie. Standart tret'ego pokolenija [Material science and technology of structural materials: textbook. Part 1. Materials science. third generation standard]. Arkhangel'sk: Northern (Arctic) Federal University; 2015. (In Russ).

4 Potekhin B.A. Metallovedenie [Metallurgy]: textbook. Ekaterinburg: IGLTU; 2019. (In Russ).

5 Pavlov V.A., Lozovaya E.Yu., Babenko A.A. Specmetallurgija stalej i splavov [Special metallurgy of steels and alloys]: textbook. Yekaterinburg: Ural University Press; 2018. (In Russ).

Информация об авторах

Л.М. Савиных – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 851161.

Т.А. Дудорова – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 1153163.

С.Ю. Помялов – старший преподаватель; AuthorID 1153158.

Т.В. Корнюшева – старший преподаватель; AuthorID 102100.

Information about the authors

L.M. Savinykh – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 851161.

T.A. Dudorova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 1153163.

S.Yu. Pomyalov – Senior Lecturer; AuthorID 1153158.

T.V. Kornysheva – Senior lecturer; AuthorID 102100.

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; одобрена после рецензирования 08.05.2022; принята к публикации 25.08.2022.

The article was submitted 07.04.2022; approved after reviewing 08.05.2022; accepted for publication 25.08.2022.