

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.17

УДК 669.2; 544.3; 621.74.041; 621.74.045

М.Н. Никитченко, А.С. Семуков, Д.В. СаулинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**А.Ю. Ябуров**

ПАО «Протон – Пермские моторы», Пермь, Россия

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛИТЬЕВОЙ ФОРМЫ
С МЕТАЛЛОМ ПРИ ЛИТЬЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Металлический титан широко используется в технике в связи с комплексом особых свойств, связанных с его высокой прочностью, легкостью и физиологической инертностью. Совокупность данных свойств делает его незаменимым при производстве летательных аппаратов, специальных транспортных средств, а также широко используется для изготовления протезов. Вредными примесями в титане являются водород, азот, кислород и ряд других, которые делают его хрупким и непригодным для промышленного использования, поэтому литье титана производят под вакуумом или в атмосфере инертных газов. Например, при литье титановых сплавов на поверхности отливки обычно образуется так называемый α -слой, слой повышенной твердости, приводящий к поверхностной хрупкости всего изделия. Целью настоящей работы явилось изучение термодинамической возможности взаимодействия материалов литьевых форм с металлом при литье титановых сплавов. С целью проверки алгоритма расчетов и корректность выбора исходных данных было проведено сравнение результатов расчетов с литературными данными, которое показало удовлетворительную сходимость результатов. Термодинамические расчеты подтвердили необходимость литья титана под вакуумом в предварительно высушенные формы, так как компоненты воздуха и пары воды будут необратимо реагировать с титаном с образованием соответствующих соединений. Как известно, при литье титана широко используются как формы из графита, так и формы, содержащие корунд, углерод и алюминий на кремнесодержащем связующем. Термодинамические расчеты показали, что формы из оксида алюминия на кремнесодержащем связующем не будут инертны при литье титана. При использовании форм, содержащих углерод термодинамически, вероятно образование карбида титана, количество которого будет опреде-

ляться кинетическими закономерностями его образования. Термодинамические расчеты показали, что наиболее инертным по отношению к титану является оксид иттрия.

Ключевые слова: термодинамические расчеты, литье, титан, α -слой, формы, керамические оболочки, взаимодействие при литье.

M.N. Nikitchenko, A.S. Semukov, D.V. Saulin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

A.Yu. Yaburov

Proton – Perm Motors PJSC, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION OF A THERMODYNAMIC PROBABILITY OF INTERACTION BETWEEN MATERIALS OF CASTING MOLD AND METAL DURING CASTING OF A TITANIUM ALLOYS

The titanium metal is widely used in technique because of its high durability, lightweight and physiological inertness. The combination of these properties makes it indispensable for manufacture of aircraft, special vehicles, and can used for manufacture of dentures. The harmful impurities in titanium are hydrogen, nitrogen, oxygen and another, which make it a brittle and unsuitable for industrial using. Therefore titanium casting must be produced under of vacuum or under of inert gases. For example, the high hardness layer has been forming onto the surface of casting parts during titanium alloys casting. This layer leading to higher surface brittleness of final products, and it is known as alpha-case. The main objective of this work has connected with investigation of a thermodynamic probability of interaction between materials of casting mold and metal during casting of titanium alloys. Previously, has made the calculations algorithm correctness checking by calculation results and literature data comparisons, and has showed a satisfactory convergence of the results. The thermodynamic calculations confirmed of the titanium casting necessity under vacuum into the pre-dried molds, because of the air's components and water vapors will be irreversibly reacting with the titanium. Well known that the graphite molds widely used for titanium casting as well as corundum, carbon, aluminum and silica oxide binders contained molds. The thermodynamic calculations showed that the aluminum oxides with silicon oxide binders molds are not inert for titanium casting. The thermodynamic calculations showed that the titanium carbide could be synthesized at the carbon contained molds. Amount of the titanium carbide will determined by the kinetic regularities of its formation. The

thermodynamic calculations showed that the yttrium oxide would be inert material for the titanium casting.

Keywords: *thermodynamic calculations, casting, titanium, alpha-case, molds, interaction during casting.*

Известно [1], что титан является достаточно распространенным элементом в природе, однако в свободном виде он не встречается, а обычно находится в кислородных соединениях, таких как рутил, ильменит, титаномагнетит, перовскит, титанит и т.д., которые являются сырьем для производства металлического титана. На рынке титан в основном представлен в виде титановых сплавов, используемых для специальных целей, а также в виде диоксида титана рутильной или анатазной форм, широко используемых в качестве белого пигмента.

Металлический титан является легким и твердым серебристо-белым металлом с температурой плавления 1670 °С. Титан является достаточно активным металлом, но его поверхность всегда покрыта оксидным слоем, который делает изделия из металла достаточно устойчивыми к коррозии, однако при разрушении данной пленки металл легко вступает в химические взаимодействия. Основное преимущество использования титана связано тем, что он в полтора раза легче стали при соизмеримой с ней прочностью. Это делает его незаменимым при производстве летательных аппаратов и специальных транспортных средств. Кроме того, следует отметить, что металлический титан является физиологически инертным металлом и широко используется для изготовления протезов.

Для стабилизации структуры металла и улучшения его свойств в титан обычно добавляют легирующие элементы. Широкое применение нашли сплавы титана с алюминием, хромом, молибденом, ванадием, марганцем, оловом и другими элементами [2]. Наиболее вредными примесями в титане являются водород, азот, кислород, углерод и ряд других веществ, которые делают его хрупким и непригодным для промышленного использования [3]. По этой причине плавку, разливку и дуговую сварку титана и титановых сплавов производят в вакууме или в атмосфере инертных газов.

В расплавленном состоянии титан является настолько активным, что может взаимодействовать практически со всеми огнеупорными материалами, составляющими футеровку печей. По этой причине для плавки титана и титановых сплавов обычно используют вакуумные дуговые гарнисажные печи [4], в которых расплавленный титан контак-

тирует только со слоем твердого титана на стенках водоохлаждаемого тигля. Однако при литье титановых сплавов по выплавляемым моделям при его заливке в форму и последующем охлаждении на поверхности отливки обычно образуется газонасыщенный, так называемый альфированный, или α -слой, слой повышенной твердости [5], что приводит к поверхностной хрупкости изделия. Данная проблема обычно решается двумя путями: литьем титановых сплавов в формы из графита или химическим удалением поверхностного слоя с помощью кислот. Оба способа имеют ряд недостатков, поэтому вопрос разработки новых методов подавления образования α -слоя на поверхности отливок, например путем различных добавок в массу для изготовления формы [6], остается весьма актуальным.

Следует отметить, что под понятием α -слоя в первую очередь подразумевается поверхностный слой отливки, имеющий повышенную твердость. Принято считать, что данный слой является газонасыщенным, однако причина его образования является до конца не изученной. Так, авторы статьи [7] в ходе исследований обнаружили в данном слое повышенное количество не только кислорода, но и таких элементов, как алюминий и кремний. Проведенные ими исследования показали, что, например, алюминий в α -слое находится в виде интерметаллидов типа $TiAl$ и Ti_3Al , которые, согласно фазовой диаграмме титан–алюминий [8, 9], могут образоваться в титановых сплавах, содержащих алюминий. О хрупкости данных соединений, особенно в слитках, и низкой технологической пластичности данных соединений говорится в работе [10]. При этом авторы предполагают, что повышенное содержание кислорода, алюминия и кремния в поверхностном слое отливки в основном связаны с взаимодействием титана в процессе отливки с поверхностным слоем материала формы. В работе [11] авторы с помощью термодинамических расчетов подтверждают, что на появление α -слоя может оказывать влияние содержание диоксида кремния в связующем формы. Это связано с тем, что при высоких температурах диоксид кремния связующего может реагировать с электрокорундом формы с образованием алюмосиликатов, которые при литье будут вступать в реакцию с титаном в поверхностном слое.

Таким образом, при разработке форм для литья металлов и особенно активных металлов типа титана необходимо учитывать возможность химического взаимодействия расплавленного металла с материалом формы. По этой причине в качестве материала литейной формы

или, как минимум, ее лицевого слоя, непосредственно контактирующего с металлом, необходимо использовать материалы, химически инертные к расплавленному металлу.

Результаты работы и их обсуждение

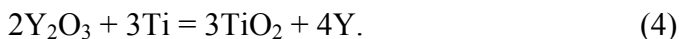
Как известно, термодинамические расчеты для определения возможности проведения процессов и образования тех или иных продуктов химических реакций достаточно широко используются не только в химической технологии, но и в металлургии [12, 13]. Примеры таких термодинамических расчетов для прогнозирования химического взаимодействия в материале формы при литье титана представлены в статье [11]. При этом алюмосиликат, образование которого было теоретически предсказано в данной статье как продукта взаимодействия электрокорунда и диоксида кремния из коллоидного связующего, был обнаружен с помощью рентгенофазового анализа керамической оболочки из электрокорунда на кремнесодержащем связующем после ее обжига при 1000 °С.

Таким образом, можно предположить, что термодинамический анализ взаимодействия металла с материалом формы позволит оценить теоретическую возможность использования тех или иных материалов при разработке состава керамики для литейных форм. Особенность данных расчетов будет связана с тем, что процессы взаимодействия жидкого металла с материалом формы относятся к гетерогенным и проводятся при высоких температурах. Для обеспечения данных расчетов необходимо теоретически предположить продукты взаимодействия металла с формой, написать уравнения химических реакций, а также найти литературные данные по термодинамическим свойствам исходных веществ и продуктов реакций. В любом случае, несмотря на множество источников информации по термодинамическим данным, включая базы данных [14–17], результаты данных расчетов будут носить теоретический характер и требовать экспериментальной проверки, так как реальная ситуация определяется не только термодинамикой, но и кинетикой взаимодействия веществ, зависящей от множества других параметров.

С целью проверки расчетов было произведено сравнение их результатов с данными работы [11] для реакций взаимодействия титана с Al_2O_3 с образованием двухвалентного и четырехвалентного оксидов титана (TiO и TiO_2):



а также взаимодействия титана с оксидом иттрия по реакциям:



Результаты расчетов представлены на рисунке.

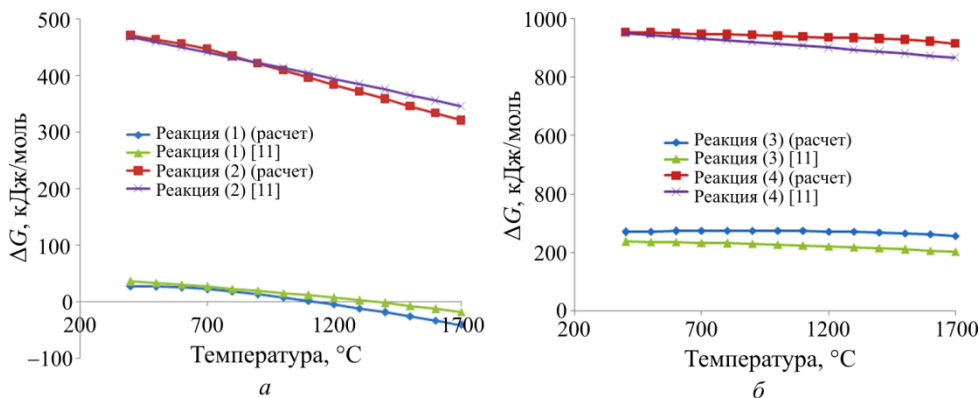
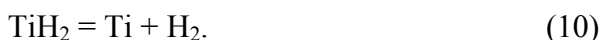


Рис. Сравнение результатов расчетов изменения энергии Гиббса: а – в реакциях (1), (2); б – в реакциях (3), (4)

На рисунке видно, что результаты расчета изменения энергии Гиббса в указанных реакциях достаточно близки к значениям из статьи [11]. При этом видно, что титан при высоких температурах может взаимодействовать с оксидом алюминия литейной формы с образованием двухвалентного оксида титана (TiO), однако образование четырехвалентного оксида титана (TiO₂) термодинамически невозможно. Взаимодействие титана с оксидом иттрия также термодинамически невозможно, следовательно, данный оксид будет инертным по отношению к титану и может использоваться при создании инертных форм для литья титана, что описывается в патенте [18].

Анализ литературы показал, что для литья титана предлагается использовать формы-оболочки с алуминатами кальция, муллитом, корундом, силикатом магния, карбидом кремния, графитом, оксидами кальция, магния, иттрия, циркония и т.д. Рассмотрим термодинамическую возможность взаимодействия некоторых из указанных соединений с титаном, а также термодинамическую возможность взаимодействия продуктов реакций в рассматриваемой системе.

Известно, что литье активных металлов, таких как титан, обычно проводится в вакууме в керамические формы, предварительно высушенные при высокой температуре, т.е. при отсутствии кислорода, азота и паров воды. Причины данных требований к процессу могут быть связаны с термодинамической вероятностью реакций, протекание которых теоретически возможно при наличии некоторых количеств кислорода, азота и паров воды:



Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

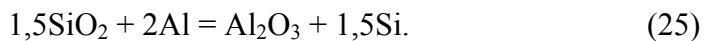
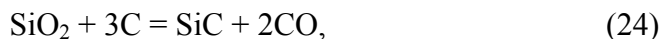
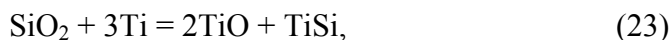
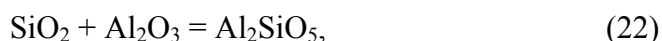
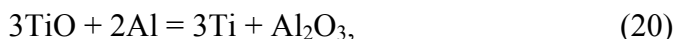
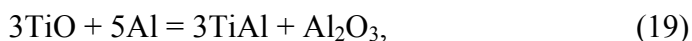
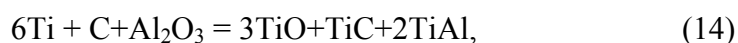
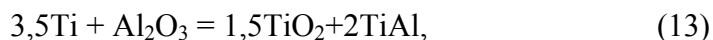
Результаты расчета ΔG уравнений реакций (5)–(10)

Номер реакции	ΔG при 500 °С, кДж/моль	ΔG при 1000 °С, кДж/моль	ΔG при 1700 °С, кДж/моль
5	-938,1	-842,2	-722,8
6	-804,6	-714,2	-590,9
7	-531,4	-435,2	-304,8
8	-304,4	-211,7	-93,9
9	-475,3	-295,4	-55,9
10	38,7	-31,8	-130,6

Как видно по результатам расчетов, все данные реакции являются необратимыми при высоких температурах. Следовательно, при наличии в зоне плавки кислорода, азота или паров воды титан может реагировать с данными веществами с образованием оксидов титана, нитрида титана и гидрида титана, причем гидрид титана является термодинамически нестабильным при высоких температурах. Реальная полнота протекания данных процессов будет определяться кинетическими закономерностями.

Таким образом, результаты термодинамических расчетов подтверждают требования по условиям литья титановых сплавов, которое, для исключения образования соединений титана, должно проводиться под глубоким вакуумом.

Как известно, при литье титана наиболее широко используются оболочки из графита, а также формы, содержащие корунд, углерод и алюминий. В качестве связующего при создании формы для литья используются композиции, содержащие оксид кремния в коллоидной форме [19]. При литье титана в формы, изготовленные с использованием данных материалов, можно предположить образование следующих продуктов взаимодействия титана и написать следующие уравнения реакций:



Результаты расчетов представлены в табл. 2. Как видно из результатов расчета, взаимодействие титана и углерода с образованием карбида титана термодинамически возможно, однако термодинамическая вероятность взаимодействия карбида титана с оксидом титана и с оксидом алюминия невелика. Титан также может взаимодействовать непосредственно с оксидом алюминия с образованием оксида двухвалентного титана и интерметаллида TiAl, возможность образования которого подтверждается в статье [8], а если в процессе будет участвовать углерод, то также может образовываться и карбид титана. Образование из титана и оксида алюминия оксида четырехвалентного титана

термодинамически маловероятно. Следует отметить, что имеющийся в составе связующего формы диоксид кремния при температурах литья не является инертным и может реагировать с титаном с образованием оксида и силицида титана, а также с оксидом алюминия формы. Образование из углерода и оксида кремния карбида кремния термодинамически маловероятно.

Таблица 2

Результаты расчета ΔG уравнений реакций (11)–(25)

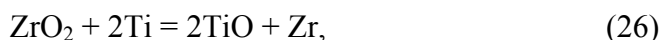
Номер реакции	ΔG при 500 °С, кДж/моль	ΔG при 1000 °С, кДж/моль	ΔG при 1700 °С, кДж/моль
11	-177,3	-169,8	-159,3
12	-113,2	-112,9	-131,7
13	87,1	79,0	66,1
14	-290,5	-282,7	-291,0
15	288,9	196,8	77,6
16	466,2	366,6	236,9
17	2104,9	1607,5	921,0
18	-69,5	-60,1	-44,6
19	-234,3	-187,6	-91,4
20	-25,7	-7,2	42,4
21	107,8	109,7	114,6
22	-5,1	-4,3	-3,4
23	-298,9	-287,9	-285,6
24	344,4	173,2	-58,4
25	-277,6	-245,7	-207,2

В случае если в составе формы будет использоваться порошкообразный металлический алюминий [7], он может взаимодействовать как непосредственно с титаном, с образованием интерметаллида TiAl, так и восстанавливать оксид титана до интерметаллида TiAl. Восстановление оксида титана до металлического титана при высоких температурах термодинамически менее вероятно. Алюминий также может реагировать с диоксидом кремния связующего с образованием оксида алюминия. Реагирование алюминия с карбидом титана термодинамически невозможно. Реальная полнота протекания данных процессов будет определяться кинетическими закономерностями.

Таким образом, термодинамические расчеты показали, что широко используемая для литья форма из оксида алюминия на кремнесодержащем связующем не будет инертна при литье титана, и в процессе этого взаимодействия могут образовываться вещества, которые могут

участвовать в образовании поверхностного α -слоя отливки. Необходимо отметить, что согласно расчетам при литье титана в формы с использованием углерода, термодинамически вероятно взаимодействие компонентов с образованием карбида титана, который, как показывают термодинамические расчеты, является инертным веществом в данной системе.

Если говорить об инертных к титану материалах, то в литературных источниках имеется информация об использовании оксидов иттрия и циркония в лицевом слое форм для литья титана [20], в связи с чем представляет интерес оценить термодинамическую вероятность возможного взаимодействия. Уравнения реакций взаимодействия оксида иттрия с титаном представлены выше [реакции (3) и (4)], а уравнения реакций взаимодействия оксида циркония с титаном следующие:



Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета ΔG уравнений реакций (2), (3), (26) и (27)

Номер реакции	ΔG при 500 °С, кДж/моль	ΔG при 1000 °С, кДж/моль	ΔG при 1700 °С, кДж/моль
2	275,5	273,8	257,5
3	473,4	465,9	454,4
26	13,7	16,7	10,9
27	147,3	144,7	142,8

Как видно из результатов расчетов, можно говорить об инертности окиси иттрия по отношению к титану. При этом термодинамическая вероятность взаимодействия окиси циркония с титаном, с образованием оксида двухвалентного титана много выше, чем реакции с образованием оксида четырехвалентного титана.

Таким образом, термодинамические расчеты показали, что из рассмотренных веществ наиболее инертным по отношению к титану является оксид иттрия. Термодинамическая вероятность взаимодействия оксида циркония с титаном также невелика, однако при определенных условиях оксид циркония теоретически может взаимодействовать с титаном с образованием его двухвалентного оксида.

Выводы

1. Термодинамические расчеты показали, что при наличии в зоне плавки кислорода, азота или паров воды титан будет реагировать с данными веществами с образованием оксидов титана, нитрида титана и гидрида титана, следовательно, для исключения образования соединений титана литье должно проводиться под глубоким вакуумом.

2. Литейные формы из оксида алюминия на кремнесодержащем связующем не будут инертными при литье титана. В процессах этого взаимодействия могут образовываться вещества, которые могут участвовать в образовании поверхностного α -слоя отливки.

3. Расчеты показали, что при литье титана в формы с использованием углерода, термодинамически возможно их взаимодействие с образованием карбида титана, который является инертным веществом в данной системе. Условия образования данного соединения будут определяться кинетическими закономерностями и требуют проведения дополнительных исследований.

4. Наиболее инертным по отношению к титану из рассмотренных веществ является оксид иттрия. Термодинамическая вероятность взаимодействия оксида циркония с титаном также невелика, однако при определенных условиях оксид циркония теоретически может взаимодействовать с титаном с образованием двухвалентного оксида титана.

Работа выполнена по заказу Министерства образования и науки РФ, проект №3306 (4.5).

Список литературы

1. Беленький Е.Ф., Рискин И.В. Химия и технология пигментов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Л.: Химия, 1974. – 656 с.

2. Материаловедение: учеб. / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

3. Аргоник: сайт. – URL: <https://argonik.ru/statya/54> (дата обращения: 22.10.2017).

4. Титов Н. Д., Степанов Ю. А. Технология литейного производства. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

5. Солнцев С.С., Туманов А.Т. Защитные покрытия металлов при нагреве: справ. пособие. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.

6. Разработка ресурсосберегающей технологии получения крупногабаритных отливок из титановых сплавов / А.О. Деменок, А.А. Ганеев, О.Б. Деменок, С.В. Бакерин, Б.А. Кулаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Металлургия. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 20–25.

7. Formation of Alpha Case Mechanism on Titanium Investment Cast Parts / Si-Young Sung, Beom-Suck Han, Young-Jig Kim // Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, Dr. A.K.M. Nurul Amin (Ed.), InTech. – 2012. – P. 29–42. DOI: 10.5772/35496

8. Christoph Leyens, Manfred Peters. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. – Weinheim: Wiley-VchVerlag GmbH & Co. KGaA, 2003. – 512 p.

9. Thermodynamic Calculation of Alpha-Case Formation in Titanium alloys / Si-Young Sung, Bong-Jae Choi, Sang-Ho Noh, Chang-Su Hahn, Yong-Mun Ryu, Beom-Suck Han, Young-Jig Kim // Advanced Materials Research. – 2007. – Vol. 26-28. – P. 519-522. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.519

10. Павлинич С.П., Зайцев М.В. Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15, №4 (44). – С. 200–202.

11. Расчет физико-химического взаимодействия титановых сплавов с материалами литейной формы / А.А. Ганеев, А.О. Деменок, С.В. Бакерин, Б.А. Кулаков, И.Р. Мухамадеев, А.Р. Гарипов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Металлургия. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 70–78.

12. Владимиров Л.П. Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.

13. Панфилов А.М., Семенова Н.С. Расчет термодинамических свойств при высоких температурах: метод. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. – 32 с.

14. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.]. – 3-е изд., перераб. и расш. – М.: Наука, 1978. – 496 с.

15. NIST Chemistry WebBook: сайт. – URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (дата обращения: 22.10.2017).

16. База данных. Термические константы веществ: сайт. – URL: <http://www.chem.msu.su/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html> (дата обращения: 22.10.2017).

17. Термодинамика в сети Интернет: сайт. – URL: http://ihed.ras.ru/~thermo/thermo_inet_ru.htm (дата обращения: 22.10.2017).

18. Пат. 4740246 США, МПК В28В 7/36; С04В 35/68. Casting of reactive metals into ceramic molds / Roy C. Feagin, Boca Raton; Remet Corporation. – Заявл. 24.11.1986; опублик. 26.04.1988.

19. Пат. 4709741 США, МПК В22 С1/18, В22 С1/00. Mold material and process for casting of pure titanium or titanium alloy /Seizo Nakamura. – Заявл. 02.12.1985; опублик. 01.12.1987.

20. Пат. 102989994 Китай, МПК В22 С9/10, В22 С3/00, В22 С1/00. Preparation method of composite mold core for casting of titanium alloy / XieHuasheng, Zhao Jun, Shi Kun, Liu Shibing, Yu Zhiqiang, Liu Hongyu, Yan Ping, Liu Hongyu. – Заявл. 28.11.2012; опублик. 30.04.2014.

References

1. Belen'kii E.F., Riskin I.V. *Khimiia i tekhnologiiia pigmentov* [Chemistry and technology of pigments]. 4th ed. Leningrad, Khimiia, 1974, 656 p.

2. Arzamasov B.N. et al. *Materialovedenie* [Materials science]. 2nd ed. Ed B. N. Arzamasov. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 384 p.

3. Argonik, available at: <https://argonik.ru/statya/54> (accessed 22 October 2017).

4. Titov N.D., Stepanov Iu.A. *Tekhnologiiia liteinogo proizvodstva* [Technology of foundry production]. Moscow, Mashinostroenie, 1974, 472 p.

5. Solntsev S.S., Tumanov A.T. *Zashchitnye pokrytiia metallov pri nagreve*. Spravochnoe posobie [Protective coating of metals when heated. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 240 p.

6. Demenok A.O., Ganeev A.A., Demenok O.B., Bakerin S.V., Kulakov B.A. *Razrabotka resursosberegaiushchei tekhnologii polucheniia krupnogabaritnykh otlivok iz titanovykh splavov* [Development of resource-saving technology of receiving large-size mold pieces from titanitic alloys]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Metallurgii*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 20–25.

7. Si-Young Sung, Beom-Suck Han, Young-Jig Kim. Formation of Alpha Case Mechanism on Titanium Investment Cast Parts. *Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*, Dr. A.K.M. Nurul Amin (Ed.), InTech, 2012, pp. 29-42. DOI: 10.5772/35496.

8. Christoph Leyens, Manfred Peters. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VchVerlag GmbH& Co. KGaA, 2003, 512 p.

9. Si-Young Sung, Bong-Jae Choi, Sang-Ho Noh, Chang-Su Hahn, Yong-MunRyu, Beom-Suck Han, Young-Jig Kim. Thermodynamic Calculation of Alpha-Case Formation in Titanium alloys. *Advanced Materials Research*, 2007, vol. 26-28, pp. 519-522. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.519

10. Pavlinich S.S.P., Zaitsev M.V. Primenenie intermetallidnykh titanovykh splavov pri lit'e uzlov i lopatok GTD s oblegchennymi vysokoprochnymi konstruktsiyami dlia aviatsionnykh dvigatelei novykh pokolenii [Use of intermetallic titanic alloys when casting clusters and shovels of GTD with the facilitated high-strength designs for aviation engines of new generations]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 15, no.4 (44), pp. 200-202.

11. Ganeev A.A., Demenok A.O., Bakerin S.V., Kulakov B.A., Mukhamedev I.R., Garipov A.R. Raschet fiziko-khimicheskogo vzaimodeistviia titanovykh splavov s materialami liteinoi formy [Calculation of physical and chemical interaction of titanic alloys with materials of a foundry core]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Metallurgiya*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 70-78.

12. Vladimirov L.P. Termodinamicheskie raschety ravnovesiia metallurgicheskikh reaktsii [Thermodynamic calculations of equilibrium of metallurgical reactions]. Moscow, Metallurgiya, 1970, 528 p.

13. Panfilov A.M., Semenova N.S. Raschet termodinamicheskikh svoystv pri vysokikh temperaturakh [Calculation of thermodynamic properties at high temperatures]. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2009, 32 p.

14. Gurvich L.V., Veits I.V., Medvedev V.A. et al. Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv [Thermodynamic properties of individual substances]. 3th ed. Moscow, Nauka, 1978, 496 p.

15. NIST Chemistry WebBook, available at: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (accessed 22 October 2017).

16. Termicheskie Konstanty veshchestv, available at: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html> (accessed 22 October 2017).

17. Termodinamika v seti Internet, available at: http://ihed.ras.ru/~thermo/thermo_inet_ru.htm (accessed 22 October 2017).

18. Roy C. Feagin, Boca Raton. Casting of reactive metals into ceramic molds. Patent US4740246 (1988).

19. Seizo Nakamura. Mold material and process for casting of pure titanium or titanium alloy. Patent. 4709741 (1987).

20. XieHuasheng, Zhao Jun, Shi Kun, Liu Shibing, Yu Zhiqiang, Liu Hongyu, Yan Ping, Liu Hongyu. Preparation method of composite mold core for casting of titanium alloy. Patent Kitai 102989994 (2014).

Получено 20.10.2017

Об авторах

Никитченко Марина Николаевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Семуков Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Саулин Дмитрий Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Ябуров Александр Юрьевич (Пермь, Россия) – инженер-технолог 1-й категории ПАО «Протон – Пермские моторы» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: yaburov_alex@mail.ru).

About the authors

Marina N. Nikitchenko (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Alexander S. Semukov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Dmitry V. Saulin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: sdv_perm@mail.ru).

Alexander Yu. Yaburov (Perm, Russian Federation) – 1st category process-engineer, Proton – Perm Motors PJSC (93, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: yaburov_alex@mail.ru).