

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.2.07

УДК 669.2;621.74.045; 621.74.042

**Н.П. Углев¹, В.З. Пойлов¹, Р.А. Каримов²,
Д.В. Саулин¹, А.М. Селиванов¹**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²ПАО «Протон», Пермь, Россия

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ α -СЛОЯ ПРИ ЛИТЬЕ СПЛАВОВ ТИТАНА

Изготовление титановых отливок высокого качества при литье по выплавляемым моделям представляет собой серьезную научно-техническую проблему, поскольку сопровождается окислением и насыщением титанового сплава кислородом при литье за счет взаимодействия с остаточным кислородом или из-за химических реакций с материалом оболочки. При этом на поверхности отливки образуются обогащенные кислородом слои с видоизмененной структурой, что приводит к ухудшению их механических свойств – увеличивается твердость и хрупкость, приводящие к появлению дефектов деталей при их эксплуатации. Решение этой проблемы возможно при выявлении механизма (или механизмов) образования α -слоя, на основании чего могут быть предложены пути устранения этого нежелательного явления. В литературе представлено значительное количество работ, направленных на выявление факторов, вызывающих появление α -слоя. Проведен анализ литературных данных по влиянию материала лицевого слоя литейной формы, температуры формы перед заливкой, длительности выдержки при высокой температуре, содержания алюминия в титановом сплаве, скорости охлаждения, распределения компонентов в пристенном слое отливки. Экспериментально подтверждено, что оксид кремния растворяется в расплаве титана, а оксид алюминия устойчив при небольшом времени контакта. Проведен анализ состава и микротвердости поверхностного слоя трех отливок из сплава ВТ5Л, которые были получены методом вакуумного литья металлического расплава в керамические оболочки, выполненные из корунда (Al_2O_3), защищенного от прямого контакта с расплавом тонким слоем графита. Установлено, что микротвердость снижается при увеличении глубины α -слоя и не коррелирует с концентрацией алюминия.

Ключевые слова: титановый сплав, Ti-Al, ВТ5Л, α -слой, газонасыщенный слой, поверхностная хрупкость, оксид иттрия, оксид циркония, оксид магния, вакуумное литье титановых сплавов.

**N.P. Uglev¹, V.Z. Poilov¹, R.A. Karimov²,
D.V. Saulin¹, A.M. Selivanov¹**

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

²PJSC «Proton», Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF FORMATION OF THE α -LAYER FOR THE CASTING OF TITANIUM ALLOYS

The production of high quality titanium castings in investment casting is a serious scientific and technical problem, since it is accompanied by oxidation and saturation of titanium alloy with oxygen during casting due to interaction with residual oxygen, or due to chemical reactions with the shell material. At the same time, oxygen – rich layers with a modified structure are formed on the surface of the casting, which leads to a deterioration of their mechanical properties-hardness and brittleness increase, leading to defects in the parts during their operation. The solution to this problem is possible in the identification of the mechanism(s) of the formation of the α -layer, on the basis of which can be proposed ways to eliminate this undesirable phenomenon. The literature presents a significant number of works aimed at identifying the factors causing the appearance of the α -layer. The analysis of the literature data on the influence of the material of the front layer of the mold, the temperature of the mold before filling, the duration of exposure at high temperature, the effect of the aluminum content in the titanium alloy, cooling rate of ceramic shell, the distribution of components in the wall layer of the casting. It has been experimentally confirmed that silicon oxide dissolves in the melt of titanium, and aluminum oxide is stable at a small contact time. The composition and microhardness of the surface layer of three VT5L alloy castings, which were obtained by vacuum casting of metal melt into ceramic shells made of corundum (Al_2O_3), protected from direct contact with the melt by a thin layer of graphite, were analyzed. It was found that the microhardness decreases with increasing depth of the α -layer and does not correlate with the concentration of aluminum.

Keywords: titanium alloy, Al-Ti, α -layer, gas-saturated layer, surface brittleness, yttrium oxide, zirconium oxide, magnesium oxide, vacuum casting of titanium alloys.

Изготовление титановых отливок высокого качества при литье по выплавляемым моделям сопровождается окислением и насыщением титанового сплава кислородом при литье за счет взаимодействия с остаточным кислородом [1, 2] или из-за химических реакций с материалом оболочки [3–24]. При этом на поверхности отливки образуется обогащенный кислородом α -слой с видоизмененной структурой, что приводит к ухудшению механических свойств отливок – увеличивает твердость и хрупкость, приводящие к появлению дефектов деталей, например трещин, при их эксплуатации.

Исследованию α -слоя посвящено достаточно много работ [3–21], направленных на выявление факторов, вызывающих появление α -слоя. Исследовано влияние материала лицевого слоя литейной формы, температуры формы перед заливкой, длительности выдержки при высокой

температуре, влияние содержания алюминия в титановом сплаве, скорости охлаждения, распределения компонентов в пристенном слое отливки. Результаты исследований часто находятся в противоречии, что характеризует несогласованность результатов друг с другом или плохую воспроизводимость экспериментов. В настоящее время нельзя утверждать, что механизм образования α -слоя при литье титановых сплавов в керамические оболочки ясен до конца. В связи с этим в данной работе предпринята попытка анализа особенностей образования α -слоя при литье титановых сплавов, что представляет научный и практический интерес.

Титановые сплавы существуют в различных полиморфных состояниях (рис. 1). По соотношению количества α -фазы с гексагональной упаковкой к β -фазе с объемно-центрированной кубической решеткой различают α -, псевдо- α -, ($\alpha+\beta$)-, псевдо- β -, и β -титановые сплавы, а также сплавы на основе интерметаллидов. По влиянию на температуру полиморфных превращений легирующие элементы титановых сплавов подразделяют на α -стабилизаторы, повышающие температуру полиморфного превращения, β -стабилизаторы, понижающие ее, и нейтральные упрочнители, мало влияющие на эту температуру [1]. К α -стабилизаторам относятся Al, In, Ga. В связи с этим исследуемый нами сплав ВТ5Л титана с содержанием алюминия 5 мас. % относится к α -сплавам.

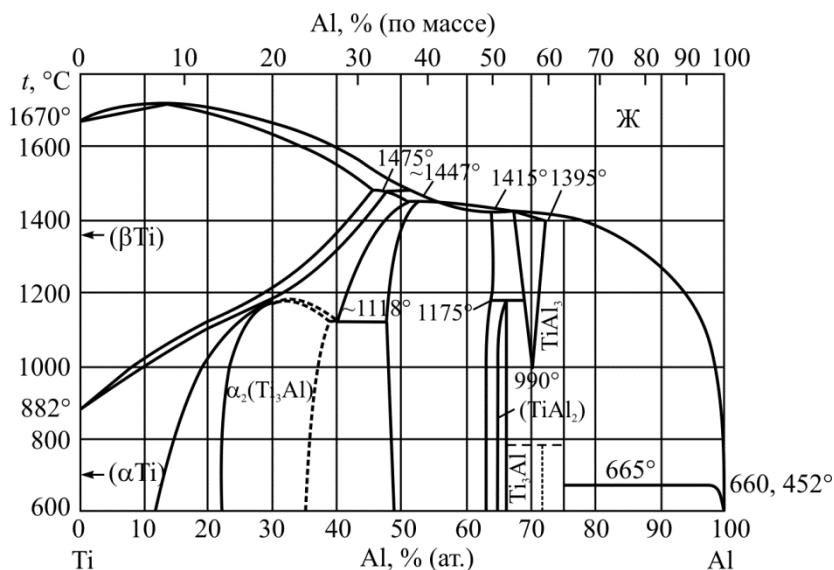


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Ti-Al [2]

В соответствии с диаграммой состояния системы Ti-Al, при медленном охлаждении и равновесной кристаллизации расплава BT5Л, содержащего 5 мас. % Al, в составе первых равновесных кристаллов у «холодной» стенки керамической формы содержание алюминия в отливке должно быть примерно 7 %, и вплоть до прохождения температуры солидуса состав пристенного слоя должен иметь повышенные концентрации алюминия, в то время как в последующих слоях за пристенным слоем расплав будет обогащаться титаном. Для сплавов, содержащих 20 мас. % Al, наоборот, пристенный слой должен обогащаться титаном. При дальнейшем охлаждении расплава ниже температуры солидуса составы фаз будут находиться сначала в области β -Ti, а потом в области α -Ti (см. рис. 1).

При быстром охлаждении расплава (закалке), характерном для процесса промышленного литья титановых сплавов в холодные керамические оболочки, сплав BT5Л, по-видимому, сразу попадает в зону α -Ti, при этом в ней, возможно, частично остаются «захваченные» зоны β -Ti, влияющие на механические свойства отливок. Известно, что примеси второго компонента влияют на скорость перехода вещества из одного в другое аллотропное состояние. При изменении параметров кристаллической решетки может происходить растрескивание образца. Следует отметить, что растрескивание обнаруживается и в поверхностных α -слоях титановых отливок, наиболее обогащенных примесями посторонних элементов по сравнению с более глубокими слоями металла. Именно этот эффект и позволяет связать, по одной из гипотез, свойства поверхностного слоя отливки с изменениями его структуры из-за изменения состава.

В работе [3] представлены результаты исследования влияния на характеристики α -слоя состава керамики лицевого слоя. Показано, что в пограничном слое металла резко возрастает содержание кислорода при одновременном падении концентрации титана, а колебания содержания алюминия и циркония незначительны. Результаты интерпретируются как внедрение кислорода в металлический слой, сопровождающееся искажением кристаллической решетки сплава, приводящее к существенному изменению механических характеристик металла в пограничном слое (рис. 2).

При выдержке твердого образца титанового сплава на воздухе при повышенной температуре (700–800 °С) он постепенно насыщается кислородом, причем скорость насыщения существенно возрастает при

повышении температуры, что связывают с повышением скорости диффузии атомов кислорода внутрь металла. Внешний газонасыщенный α -слой имеет повышенную микротвердость, снижающуюся при уменьшении содержания кислорода. Толщина α -слоя при этом также постепенно увеличивается, достигая 100 мк за 500–1000 ч.

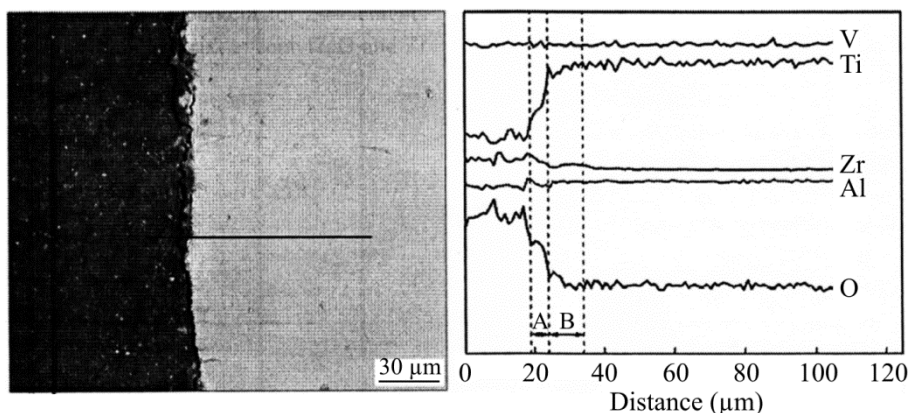


Рис. 2. Распределение компонентов сплава Ti6Al4V вблизи поверхности отливки (температура формы 400 °С, темный лицевой слой литейной формы – ZrO_2)

Корреляция между микротвердостью и содержанием кислорода в титановом сплаве рассмотрена в работе [4] (рис. 3). Видно, что с повышением содержания кислорода в α -слое титанового сплава микротвердость поверхностного слоя возрастает.

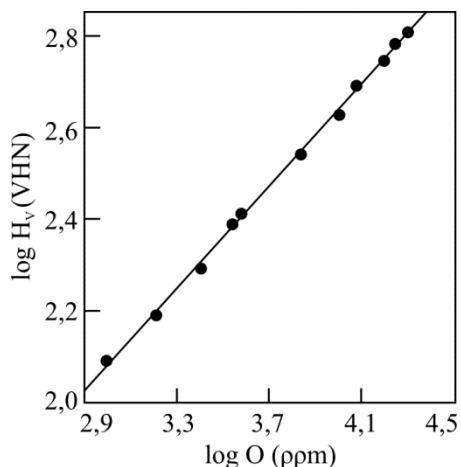


Рис. 3. Корреляция между содержанием кислорода и микротвердостью в α -слое титанового сплава

Типичное распределение микротвердости в α -слое титанового сплава представлено на рис. 4, из которого следует, что даже при использовании керамических литевых форм, выполненных из наиболее инертных оксидов иттрия и циркония, толщина α -слоя составляет 40–50 мкм.

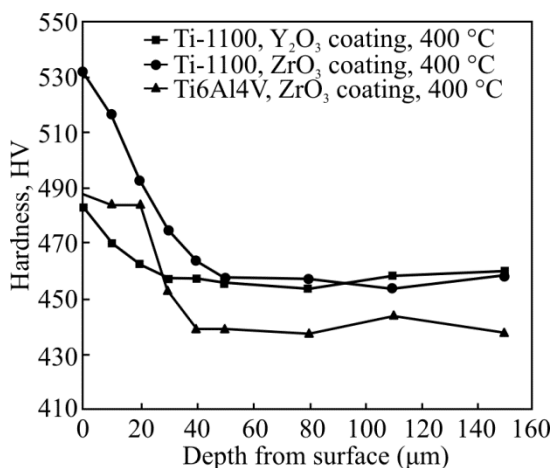
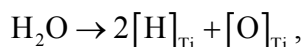


Рис. 4. Изменение микротвердости сплавов титана в α -слое отливки при литье в керамические формы из оксидов иттрия и циркония (температура керамической формы перед заливкой – 400 °C [3])

Нерешенным вопросом при интерпретации этих результатов является источник кислорода, возможно диффундирующего в расплав с поверхности раздела фаз. Если при термической обработке твердых отливок в кислородсодержащей атмосфере этот вопрос не возникает, то в случае литья сплава в керамические оболочки в условиях вакуума или очищенного аргона источник кислорода не ясен. Предполагается [4], что поставщиком кислорода могут являться пары воды, содержащиеся в газе, которые при взаимодействии с титаном диссоциируют по реакции



после чего кислород и водород растворяются в металле и влияют на его свойства. В той же работе [4] сделана попытка объяснения неравномерности распределения α -слоя на поверхности металла за счет турбулизации расплава в момент заливки в керамическую оболочку. Однако, по нашему мнению, турбулизация потока должна привести к полному искажению экспоненциального профиля кривой микротвердости по всей поверхности отливки, чего не наблюдается на практике. Предполагается

также, что оксиды металлов, из которых состоит керамическая оболочка литейной формы, в зависимости от состава могут частично физически растворяться в расплаве титана в молекулярном виде (с последующей диссоциацией) или химически взаимодействовать с расплавом с образованием титанатов металлов. Однако некоторые окислы остаются инертными к расплаву титана. Так, например, показано, что при контакте расплава чистого титана с керамическим материалом из TiO_2 и TiAl_3 простое растворение или химическое взаимодействие не происходят [5], что подтверждается отсутствием α -слоя (рис. 5).

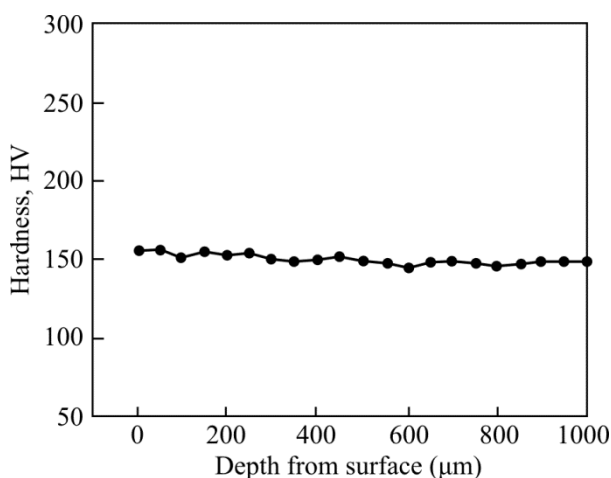


Рис. 5. Микротвердость поверхностного слоя отливки после заливки и охлаждения чистого титана в керамическую форму из TiO_2 и TiAl_3 [5]

По данным [24], наиболее инертными по отношению к расплаву титана являются оксиды иттрия, циркония, магния, кальция, карбиды титана, гафния и цирконат кальция. В то же время кислород полностью растворим в жидком титане, образуя с ним сложную диаграмму перитектического типа (рис. 6).

Процесс насыщения расплава титана кислородом ограничен только длительностью контакта кислорода с расплавом и может дойти до 40 мас. % содержания кислорода. Процесс нарастания α -слоя в твердом сплаве достаточно медленный и существенно зависит от температуры. В то же время при литье в вакуумной печи или тем более в печи, заполняемой чистым аргоном, скорость охлаждения расплава, заливаемого в холодную форму, достаточно высока, в результате чего длительность контакта расплава с материалом формы, оцененная нами по уравнению

Ньютона – Рихмана, составляет от 6 до 10 мин. После чего металл застывает и сжимается, в результате чего механический контакт титана с формой прекращается. Поэтому можно считать, что α -слой образуется за период времени 6–10 мин.

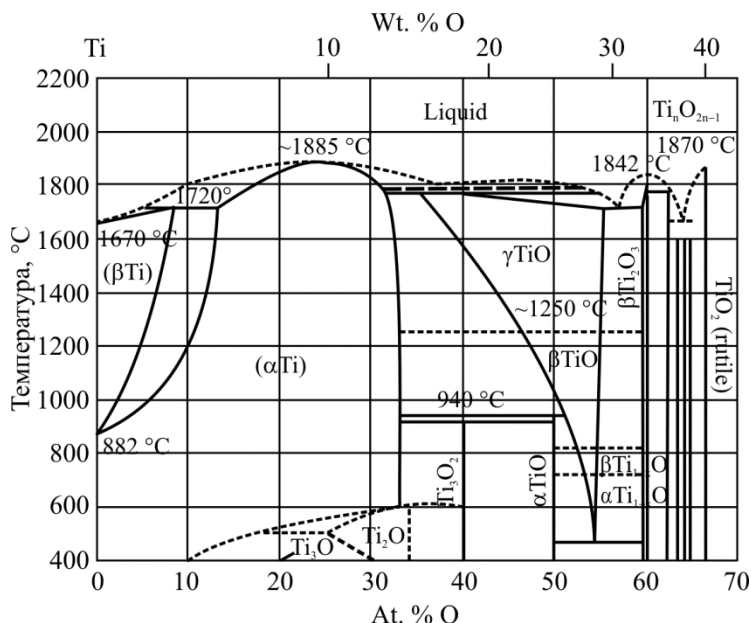


Рис. 6. Диаграмма состояния Ti–O [2]

Следует отметить также, что при практикуемом разряжении ($\approx 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) массы остаточного кислорода в объеме литейной печи по материальному балансу недостаточно для образования α -слоя заметной толщины в пересчете на полную поверхность всех деталей, получающихся при одновременной заливке. Таким образом, образование α -слоя определенной толщины в данном случае должно зависеть как от остаточного содержания кислорода в печи, так и от суммарной величины поверхности отливок, что ранее не принималось во внимание.

Кислород может попасть в поверхностный слой титановой отливки также за счет растворения диоксида кремния, являющегося составной частью керамической оболочки при использовании в качестве связующего коллоидного кремнезема. При этом в поверхностном слое будет происходить накопление элементов, связанных с кислородом (рис. 7).

Кривые на рис. 7 показывают существенную разницу в концентрации Y и Si в поверхностном слое отливки титана. Оксид иттрия, как указано выше, в отличие от диоксида кремния, термодинамически ус-

тойчив к расплаву титана и не растворяется в нем, в результате содержание иттрия в поверхностном слое отливки почти в 15 раз меньше, чем кремния.

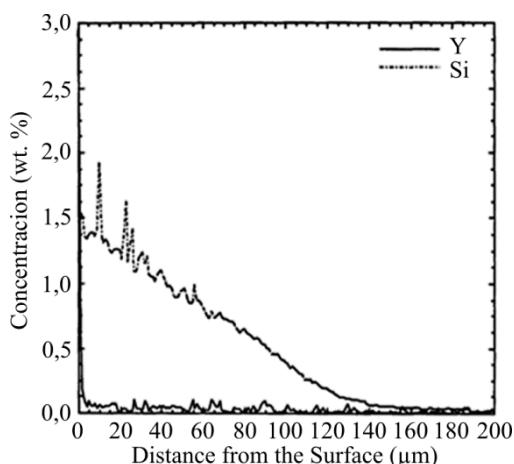


Рис. 7. Содержание Y и Si в отливке при литье титанового сплава в разогретую до 800 °С керамическую форму с лицевым слоем на основе Y/Si керамики [6]

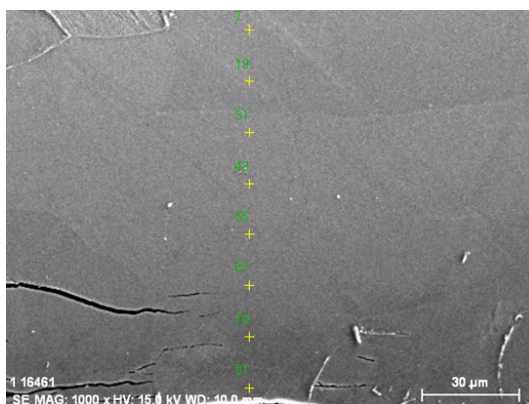
Установлено, что при защите керамических оболочек литейной формы от прямого контакта с жидкими титановыми сплавами пленкой графита или пироуглерода растворение SiO_2 в расплаве титана прекращается, хотя углерод термодинамически неустойчив в этих условиях [24]. По нашему мнению, углеродная пленка при этом выполняет несколько полезных функций, способствующих уменьшению α -слоя в отливках: снижает смачиваемость и проницаемость расплавом титана лицевого слоя керамической формы, уменьшает растворимость в расплаве компонентов лицевого слоя, восстанавливает образующиеся при химическом взаимодействии оксиды титана и примесных соединений.

В связи с этим нами проведены несколько экспериментов, посвященных выяснению вопросов, связанных с формированием α -слоя. Эксперимент по взаимодействию Al_2O_3 и SiO_2 с титановым сплавом проводили при температуре 1800 °С в вакууме, для чего в алундовом тигле, внутри которого была закреплена перегородка из кварца, расплавили сплав ВТ5Л, который контактировал с твердыми окислами 12,5 мин и был охлажден до застывания. Анализ структуры и состава поперечного среза отливок на границе металла и керамики (область α -слоя) проводили

с помощью сканирующего электронного микроскопа S-3400N японской фирмы Hitachi с приставкой фирмы «Брукер» для количественного рентгеноспектрального анализа. Погрешность определения содержания компонентов не превышала 3 % отн. В результате взаимодействия кварцевая перегородка полностью растворилась в расплаве титана, в то время как поверхностный слой алундового тигля, как со стороны, защищенной графитом, так и в чистом виде остался без изменений.

Таким образом, можно заключить, что при небольшом времени контакта оксид алюминия, не защищенный пленкой графита, в отличие от диоксида кремния, является инертным к расплаву титана при температуре до 1800 °С. Следует отметить, что эта инертность имеет чисто кинетическую природу, поскольку термодинамический расчет [24] указывает на возможность химического взаимодействия Al_2O_3 с расплавом титана при высоких температурах.

Проведен анализ состава и микротвердости поверхностного слоя трех отливок из сплава BT5Л, которые были получены методом вакуумного литья металлического расплава в керамические оболочки, выполненные из корунда (Al_2O_3), защищенного от прямого контакта с расплавом тонким слоем графита. На микрофотографии шлифа отливки титанового сплава (рис. 8) отчетливо просматриваются трещины в зоне α -слоя на глубине 30–50 мк от поверхности образца, что подтверждает литературные данные.



происходит на первых 40 мкм глубины отливки, после чего она уже не изменяется, в то время как микротвердость продолжает снижаться вплоть до 500 мкм. В α -слое образца № 2 (рис. 11, 12) содержание алюминия мало изменяется по глубине слоя, а микротвердость падает. Аналогичные закономерности снижения микротвердости наблюдаются в образце № 3 (рис. 13), в то время как содержание алюминия практически не изменяется по глубине слоя.

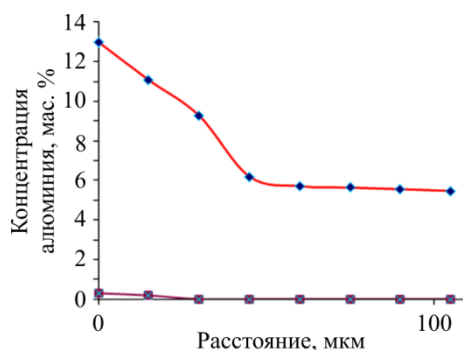


Рис. 9. Распределение алюминия (верхняя кривая) и кремния в поверхностных слоях титанового сплава (образец № 1)

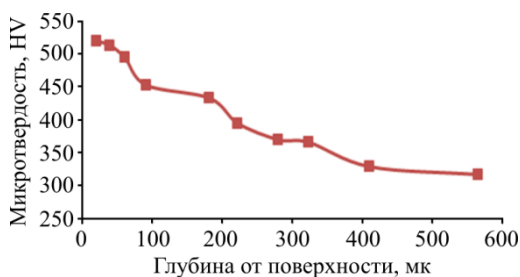


Рис. 10. Микротвердость в α -слое образца № 1 (измерена на приборе Microhardness Tester FM-300, США)

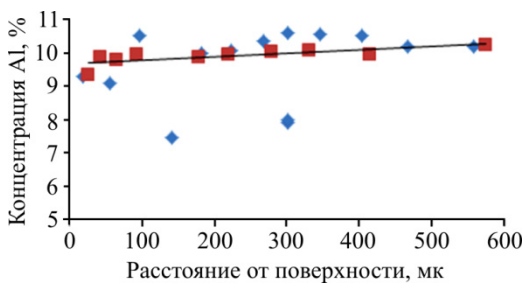


Рис. 11. Распределение алюминия в поверхностных слоях титанового сплава (образец № 2)

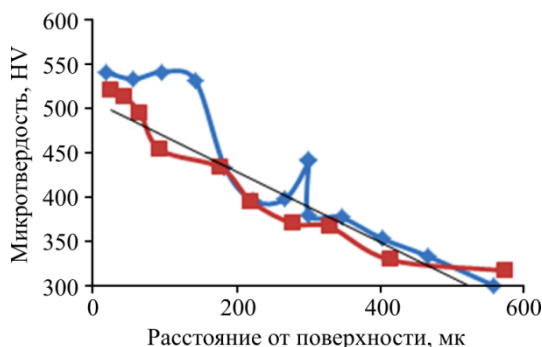


Рис. 12. Микротвердость в α -слое образца № 2

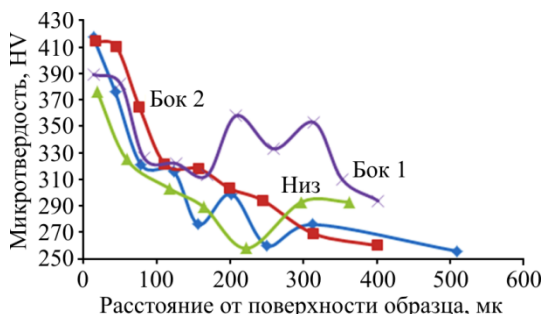


Рис. 13. Микротвердость в α -слое образца № 3

Таким образом, микротвердость α -слоя образцов титановых отливок не коррелирует с содержанием алюминия. Следовательно, содержащийся в сплаве примесный алюминий ни в какой форме не является причиной образования α -слоя. В связи с этим можно предположить, что причиной изменения микротвердости является структура литейного сплава, приобретаемая при застывании расплава, характеристики которой функционально связаны с расстоянием от поверхности контакта расплава и литейной формы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП (задание № 11.3499.2017/ПЧ, проект 3306).

Список литературы

1. Химическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. Н.С. Зефирова. – Т. 4. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – 639 с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
3. Interfacial reactions between Ti-1100 alloys and ceramic mould during investment casting / Zhao Er-Tuan, Kong Fan-tao, Chen Yu-yong, Li Bao-hui // Transaction of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – № 21. – P. 348–352.

4. Evaluation of the reactivity of titanium with mould materials during casting / R.L. Saha, T.K. Nandy, R.D.K. Misra, K.T. Jacob // *Bull. Mater. Sci.* – 1989. – Vol. 12, № 5. – P. 481–493.
5. Titanium Alpha Case Prevention / Justin Chretien; Matthew King; William Proia; Stacy Rudolf. – Worcester polytechnic institute (WPI), 2010.
6. Frueh Ch. The effect of silica-containing binders on the titanium/face coat reaction. – University of Arizona, 1969. – 114 p.
7. Kobrin P.A. Casting of Titanium alloys // *Materials behavior branch Metals and ceramics division.* – Laboratory of Air Force Materiel, 1996. – P. 101.
8. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications / ed. by Ch. Leyens, M. Peters. – Weinheim, 2003.
9. Si-Young Sung¹, Beom-Suck Han¹, Young-Jig Kim. Formation of Alpha Case Mechanism on Titanium Investment Cast Parts // *Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications* / ed. by Dr. A.K.M. Nurul Amin. – InTech, 2012. – 228 p.
10. Study of alpha-case depth in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V alloys / R. Gaddam, B. Sefer, R. Pederson, N-OL. Antti // *Materials Science and Engineering: 7th EFIGM International Conference on Advanced Materials Research IOP.* – 2013. – № 48. DOI: 10.1088/1757-899X/48/1/012002
11. Birhan Sefer. Oxidation and Alpha-Case Phenomena in Titanium Alloys Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V used in Aerospace Industry. – Luleå University of Technology, 2014. – 14 p.
12. Расчет физико-химического взаимодействия титановых сплавов с материалами литейных форм / А.А. Ганеев, А.О. Деменок, С.В. Бакерин, Б.А. Кулаков, И.Р. Мухамедеев, А.Р. Гарипов // *Bulletin of the South Ural State University. Metallurgy.* – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 70–78.
13. 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. Metallurgy.* – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 20–25.
14. 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 and Young-Jig Kim // *Advanced Materials Research Online: 2007-10-02.* – Vol. 26-28. – P. 519–522. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.519
15. Chennakesava R. Alavala. Thermo-mechanical Behaviour and Metal-to-Mould Reactions of Cristobalite Investment Shell Moulds to Cast Ti-6Al-4V Alloy // *International Journal of Advanced Research.* – 2016. – Vol. 4, iss. 1. – P. 101–106.
16. Выбор связующих на водной основе для оболочковых форм литья по выплавляемым моделям титановых сплавов / И.Р. Мухамедеев, О.Б. Деменок, А.А. Ганеев, С.П. Павлинич, П.В. Аликин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Metallurgy.* – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 95–104.

17. Effect of Mold Material and Binder on Metal-Mold Interfacial Reaction for Investment Casting of Titanium Alloys / Myoung-Gyun Kim, Shae. K. Kim and Young-Jig Kim // *Material Transactions*. – 2002. – Vol. 43, № 4. – P. 745–750.

18. Alpha case formation mechanism in Ti-6Al-4V alloy investment castings using YFSZ shell moulds / A.M. Bauristhene, K. Mutombo, W.E. Stumpf // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2013. – Vol. 113. – P. 357–361.

19. Charterization of alpha-case layer on Ti6Al4V Investment Casting / K. Mutombo, N.E. Mazibuko, P. Rossow // *South Africa*. – CSIR, 2011. – P. 1–25.

20. Branscomb T. Shell Materials and Casting Method for Casting Titanium with Minimum Alpha Case // *Rosen Shingle Cveek Golf Resont*. – Orlando, USA, 2015. – P. 1–10.

21. 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* / ed. by Dr. A.K.M. Nurul Amin. – InTech, 2012. – P. 29–42. DOI: 10.5872/35496

22. Концентрационная неоднородность при литье многокомпонентных высокотемпературных сплавов / Н.П. Углев, В.З. Пойлов, В.Л. Звездин [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2015. – № 1. – С. 14–16.

23. Таблицы физических величин: справ. / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

24. Изучение термодинамической возможности взаимодействия материалов литейной формы с металлом при литье титановых сплавов / М.Н. Никитченко, А.С. Семуков, Д.В. Саулин, А.Ю. Ябуров // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2017. – № 4. – С. 249–263.

References

1. Bol'shaia Rossiiskaia entsiklopediia. Tom 4. Khimicheskaiia entsiklopediia [Big Russian Encyclopedia. Vol. 4. Chemical encyclopedia]. Ed. N.S. Zefirov. Moscow, 1995, 639 p.

2. Diagrammy sostoiianiia dvoinykh metallicheskih system [Diagrams of the state of double metal systems]. Ed. Liakisheva N.P. Moscow, Mashinostroenie, 1996, 992 p.

3. Transaction of Nonferrous Metals Society of China. Interfacial reactions between Ti-1100 alloys and ceramic mould during investment casting. Zhao Er-Tuan; Kong Fan-tao; Chen Yu-yong; Li Bao-hui, pp. 348-352.

4. Saha R.L., Nandy T.K., Misra R.D.K., Jacob K.T. Evaluation of the reactivity of titanium with mould materials during casting. *Bull. Mater. Sci.* 1989, Vol.12, no. 5, p. 481-493.

5. Justin Chretien; Matthew King; William Proia; Stacy Rudolf. Titanium Alpha Case Prevention. April 27, 2010, *Worcester polytechnic institute (WPI)*.

6. The effect of silica-containing binders on the titanium/face coat reaction. Frueh, Christian. University of Arizona, 1969, p. 114.

7. Kobrin P.A. Casting of Titanium alloys. Materials behavior branch Metals and ceramics division. Laboratory of Air Force Materiel. Final report for June 1995 to February 1996. February 1996, p. 101.
8. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Edited by Christoph Leyens, Manfred Peters, Copyright © 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
9. Si-Young Sung¹, Beom-Suck Han¹ and Young-Jig Kim. Formation of Alpha Case Mechanism on Titanium Investment Cast Parts //Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, Edited by Dr. A.K.M. Nurul Amin, ISBN: 978-953-51-0354-7, InTech, 2012, 228 p.
10. Gaddam R., Sefer B., Pederson R., Antti N-OL. Study of alpha-case depth in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V alloys. 7th EEIGM International Conference on Advanced Materials Research IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 48 (2013) 012002 doi:10.1088/1757-899X/48/1/012002
11. Birhan Sefer. Oxidation and Alpha–Case Phenomena in Titanium Alloys Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo and Ti–6Al–4V used in Aerospace Industry: Luleå University of Technology, 2014, 14 p.
12. Ganeev A.A., Demenok A.O., Bakerin S.V., Kulakov B.A., Mukhamadeev I.R., Garipov A.R. Raschet fiziko-khimicheskogo vzaimodeistviia titanovykh splavov s materialami liteinykh form [Calculation of the physico-chemical interaction of titanium alloys with materials of foundry molds]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16. no. 3, pp. 70-78.
13. Demenok A.O., Ganeev A.A., Demenok O.B., Bakerin S.V., Kulakov B.A. Razrabotka resursosberegaiushchei tekhnologii polucheniia krupnogabaritnykh otливok iz titanovykh splavov [Development of resource-saving technology for large-sized castings from titanium alloys]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia «Metallurgii»*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 20–25.
14. Si-Young Sung, Bong-Jae Choi, Sang-Ho Noh, Chang-Su Hahn, Yong-Mun Ryu, Beom-Suck Han and Young-Jig Kim. Thermodynamic Calculation of Alpha-Case Formation in Titanium alloys. *Advanced Materials Research Online*: 2007-10-02 ISSN: 1662-8985, Vols. 26-28, pp 519-522 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.519 © 2007 Trans Tech Publications, Switzerland.
15. Thermo-mechanical Behaviour and Metal –to-Mould Reactions of Cristobalite Investment Shell Moulds to Cast Ti-6Al-4V Alloy. Chennakesava R Alavala. *International Journal of Advanced Research* (2016), Volume 4, Issue 1: 101-106.
16. Mukhamadeev I.R., Demenok O.B., Ganeev A.A., Pavlinich S.P., Alikin P.V. Vybór svyazuiushchikh na vodnoi osnove dlia obolochkovykh form lit'ia po vyplavliaemym modeliam titanovykh splavov [Choice of water-based binders for shell molds for investment casting of titanium alloys]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia «Metallurgii»*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 95–104.
17. Myoung-Gyun Kim, Shae.K.Kim, Young-Jig Kim. Effect of Mold Material and Binder on Metal-Mold Interfacial Reaction for Investment Casting of Titanium Alloys. *Material Transactions*, 2002, vol. 43, no. 4, pp. 745-750.
18. Bauristhene A.M., Mutombo K., Stumpf W.E. Alpha case formation mechanism in Ti-6Al-4V alloy investment castings using YFSZ shell moulds. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013, vol. 113, April, pp. 357-361.

19. Mutombo K., Mazibuko N.E., Rossow P. Characterization of alpha-case layer on Ti6Al4V Investment Casting. *South Africa*, CSIR 2011, pp. 1-25.
20. Shell Materials and Casting Method for Casting Titanium with Minimum Alpha Case. Tom Branscomb, Buntrock Industries, Inc. pp. 1-10.
21. 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: 10.5872/35496.
22. Uglev N.P., Poilov V.Z., Zvezdin V.L. et al. Kонтсentratsionnaia neodnorodnost' pri lit'e mnogokomponentnykh vysokotemperaturnykh splavov [Concentration heterogeneity in the casting of multicomponent high-temperature alloys]. *Metallurgiiia mashinostroeniia*, 2015, no. 1, pp. 14-16.
23. Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik [Tables of physical quantities. Directory]. Ed. Kikoina I.K. Moscow, Atomizdat, 1976, 1008 p.
24. Nikitchenko M.N., Semukov A.S., Saulin D.V., Iaburov A.Iu. Izuchenie termodinamicheskoi vozmozhnosti vzaimodeistviia materialov lit'evoi formy s metallom pri lit'e titanovykh splavov [Study of the thermodynamic possibility of interaction of materials of a mold with a metal during the casting of titanium alloys]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiiia i biotekhnologiiia*. Perm, 2017, no. 4, pp. 249-263.

Получено 15.05.2018

Об авторах

Углев Николай Павлович (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ouglev@mail.ru).

Пойлов Владимир Зотович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Каримов Радик Альбертович – заместитель главного металлурга ПАО «Протон» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93).

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).

Селиванов Артем Михайлович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ouglev@mail.ru).

About the authors

Nikolay P. Uglev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Associate professor, Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: ouglev@mail.ru).

Vladimir Z. Poilov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Radik A. Karimov (Perm, Russian Federation) – Deputy Chief Metallurgist of PJSC "Proton" (93, Komsomolsky av., Perm, 614990).

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

Artem M. Selivanov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ouglev@mail.ru).