

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.08

УДК 621.744.3; 669.295

А.В. Тиунова, Д.В. Саулин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТНЫХ ОКСИДОВ НА ВНУТРЕНнюю ПОВЕРХНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ЛИТЬЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

При литье титановых сплавов на поверхности отливки образуется слой с видоизмененной структурой, так называемый α -слой, наличие которого на поверхности детали недопустимо. Точные причины образования α -слоя неизвестны, но считается, что его наличие является следствием взаимодействия металла и формы в процессе литья, поэтому с целью подавления его образования рекомендуется использовать формы с низкой реакционной способностью по отношению к титану. Традиционный метод создания формы с лицевым слоем имеет ряд серьезных недостатков. Альтернативным является метод создания лицевого слоя на внутренней поверхности уже готовой формы посредством нанесения на нее оксида алюминия с последующей его пропиткой термически разлагаемыми солями. При этом слой оксида алюминия может быть получен с использованием алюмозоля.

Представленные в статье результаты исследований были получены в два этапа: первый – создание на поверхности литьевой керамики бездефектного слоя оксида алюминия, второй – модификация слоя оксида алюминия посредством внесения в его объем инертных к титану оксидов. В ходе исследований было определено, что перед нанесением раствора алюмозоля поверхность формы следует увлажнять и использовать достаточно разбавленные растворы алюмозоля, не стремясь создать слой оксида алюминия максимальной толщины по причине его склонности к дефектам. В ходе модификации данного покрытия было определено, что для его пропитки можно использовать как раствор нитрата иттрия, так и нитрата лантана, однако использование нитрата лантана предпочтительнее, так как это приводит к большей поверхностной концентрации оксида лантана в покрытии. При этом концентрация оксидов в поверхностном слое практически не зависит от условий создания на первом этапе покрытия из оксида алюминия, поэтому следует использовать способ, позволяющий создать из алюмозоля покрытие с минимальным количеством дефектов.

Ключевые слова: литье титановых сплавов, α -слой, алюмозоль, оксид алюминия, оксид иттрия, оксид лантана, нанесение.

A.V. Tiunova, D.V. Saulin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF CHEMICALLY INERT OXIDES DEPOSITION ONTO THE INNER SURFACE OF CERAMIC MOULDS FOR TITANIUM ALLOYS CASTING

During titanium alloys casting, a layer with a modified structure is forming onto the surface of the casting parts, which named as α -case. The presence of α -case onto the surface of the part is unacceptable. The exact reasons for the α -case formation are unknown, but it is believed that its presence is due to the interaction between metal and mold during casting, therefore for prevent of its formation, it is recommended to use a moulds with a low reactivity to titanium. The traditional method of moulds making with a specific face layer has a number of serious disadvantages. An alternative method is to create a face layer onto the inner surface of a mold by applying aluminum oxide and then impregnating it by thermally decomposing salts. In this case, a layer of aluminum oxide can be obtaining by alumina sol using.

The research results presented in the article were obtaining in two stages: the first stage – creating a defect-free layer of aluminum oxide onto the surface of casting ceramics, and the second stage – modifying the aluminum oxide layer by inert oxides adding into its volume. During of research, it was determined that before alumina sol solution deposition, the surface of the molds should be moistened and used alumina sol solutions should be diluted. Also is unacceptable to create a layer of aluminum oxide with maximum thickness due to its tendency to defects. During the modification of aluminum oxide coating, it was determined that both a solution of yttrium nitrate and lanthanum nitrate can be used for aluminum oxide impregnation, however the lanthanum nitrate is preferable, because of it leads to a greater surface concentration of lanthanum oxide in the aluminum oxide coating. At the same time, the concentration of oxides in the surface layer practically does not depend on the conditions for aluminum oxide coating creating at the first stage, therefore should be use a method that allows to create a aluminum oxide coating from alumina sol with a minimum number of defects.

Keywords: *titanium alloys casting, α -case, alumina sol, alumina oxide, yttrium oxide, lanthanum oxide, deposition.*

Известно, что при литье титановых сплавов на поверхности отливки образуется слой повышенной твердости и хрупкости, называемый α -слоем, наличие которого на поверхности детали недопустимо, так как может привести к ее механической поломке в ходе эксплуатации, поэтому данный слой обычно удаляют механически или химически, с образованием большого количества стоков, увеличивающих антропогенную нагрузку на окружающую среду [1], либо подавляют его образование путем использования графитовых или графитизированных

литьевых форм [2], также имеющих ряд существенных недостатков. Наиболее вероятной причиной образования α -слоя является взаимодействие металла и формы [3], поэтому наиболее перспективным считается использование защитных покрытий из инертных материалов. Традиционным методом создания формы с лицевым слоем является нанесение композиции вяжущего и материала лицевого слоя, например оксида иттрия, являющегося наиболее инертным к титану материалом [4], непосредственно на модель, с последующим выращиванием поверх нее тела самой формы. Однако данный метод имеет ряд недостатков, связанных с адгезией лицевого слоя к телу формы, стабильностью суспензии лицевого слоя, возможной пропиткой лицевого слоя кремнезольевыми связующими при выращивании тела формы с последующей потерей инертных свойств лицевого слоя и пр., что приводит к значительным сложностям и ограничениям при создании такой формы. Непосредственное нанесение оксида на внутреннюю поверхность формы является весьма проблематичным по причине сложности конструкции литейной формы. Необходимо отметить, что оксиды также могут быть получены непосредственно на внутренней поверхности формы из термически разлагаемых солей, однако для преимущественного нанесения солей на внутреннюю поверхность литейной формы она должна быть предварительно подготовлена нанесением на нее термостойкого пористого покрытия, например с использованием золь. С задачей создания тонкого равномерного покрытия на поверхности лучше справляется алюмозоль [5], так как кремнезоль [6] может создавать неравномерное покрытие [7]. Более того, так как оксид алюминия является более инертным к титану материалом, чем оксид кремния [8], это дополнительно позволит снизить вероятность образования α -слоя. Результаты исследования фазового состава оксида алюминия, полученного из алюмозоля, показали, что при его термической обработке при 500–600 °С образуется пористая метастабильная фаза γ - Al_2O_3 [9], которая широко используется для изготовления защитных и термобарьерных покрытий [10], ультра- и микрофильтрационных керамических мембран, при концентрировании и фракционировании растворов, для опреснения соленых вод, для очистки различных промышленных жидких отходов, для концентрирования растворов пищевых продуктов [11, 12], а также для производства катализаторов для различных сфер применения [13–15].

При дальнейшей пропитке оксида алюминия, полученного из алюмозоля, водным раствором термически разлагаемых солей, напри-

мер нитратом лантана или иттрия, и последующей термической обработке будет образовываться материал, содержащий равномерную смесь оксида алюминия и оксидов лантана или иттрия. Таким образом, вариант создания лицевого слоя внутри существующей литейной формы с использованием оксида алюминия, модифицированного инертным к титану оксидом, является весьма интересным, однако до настоящего времени особенности создания лицевого слоя данным методом определены не были.

Таким образом, основной целью работы является определение особенностей создания бездефектного лицевого слоя из оксида алюминия, модифицированного инертными к титану оксидами, непосредственно внутри существующей литейной формы.

Результаты работы и их обсуждение. Ранее проведенные исследования показали, что для создания покрытия на поверхности керамики следует использовать алюмозоль, так как он создает ровную сплошную поверхность, в отличие от кремнезоля. При этом пропитка слоя алюмозоля термически разлагаемыми солями позволила получить в нем до 20 % мас. Y_2O_3 и 24 % мас. ZrO_2 [7]. Однако для получения подобного покрытия на поверхности реальной литейной формы необходимо определиться с последовательностью и особенностями операций, включая подготовительные, выбрать требуемые концентрации веществ, уточнить режимы термической обработки, позволяющие создать из алюмозоля слой оксида алюминия, не имеющий дефектов и позволяющий нанести максимальное количество термически разлагаемых солей, продуктами которых будут являться инертные к титану оксиды, и естественно в качестве основы использовать материал реальных литейных форм, так как свойства материалов могут оказать значительное влияние на процесс и результат.

В ходе выполнения работы фрагменты литейных форм создавали из используемых на производстве суспензий лицевого и последующих слоев по заводским методикам, а в качестве термически разлагаемых солей, продуктами которых являются инертные к титану оксиды, были выбраны нитраты иттрия и лантана. План выполнения работ включал создание 75 образцов, а сама работа проводилась в два этапа.

Основной целью первого этапа являлось создание из алюмозоля на поверхности основы пленки оксида алюминия с минимальным количеством дефектов. В качестве варьируемых параметров на данном этапе были: сухая или влажная поверхность основы, концентрация

алюмозоля и количество слоев нанесения покрытия. При многослойном нанесении покрытия между нанесением слоев производили воздушную сушку образцов при 25 °С. После сушки проводили термическую обработку при 600 °С с выдержкой в течение 1 ч. Нанесение раствора алюмозоля производили только на лицевую поверхность фрагмента основы методом ополаскивания с последующим стоком избытка раствора. В случае использования влажной поверхности основы, ее поры предварительно заполняли водой методом окунания и последующей выдержки в течение заданного времени. Количество нанесенного оксида алюминия определяли весовым методом, а толщину покрытия с помощью оптического микроскопа.

Основной целью второго этапа явилось внесение в состав поверхностной пленки оксида алюминия, полученной из алюмозоля, максимального количества термически разлагаемых солей с минимальным количеством дефектов поверхностной пленки и максимальной концентрацией в ней инертных к титану оксидов. Для пропитки использовали растворы солей с концентрацией нитрата иттрия 19,7 мас.% в пересчете на оксид иттрия и нитрата лантана 28,2 мас.% в пересчете на оксид лантана, различие в которых объясняется лучшей растворимостью нитрата лантана, нежели нитрата иттрия. Нанесение раствора солей производили только на сформированную поверхность слоя из оксида алюминия, т.е. после термической обработки, методом ополаскивания с последующим стоком избытка раствора. Далее производили воздушную сушку образцов при 25 °С и последующую термическую обработку при 600 °С с выдержкой в течение 1 ч. Концентрацию оксидов иттрия и лантана в лицевом слое анализировали с помощью энергодисперсионного микроанализа с помощью электронного микроскопа (СЭМ).

При выполнении первого этапа основным критерием было отсутствие дефектов на поверхности пленки оксида алюминия после термической обработки (рис. 1).

В ходе выполнения работы было определено, что условия создания на поверхности фрагмента формы пленки оксида алюминия в значительной мере зависят от концентрации алюмозоля, поэтому при проведении исследований использовали массовые соотношения алюмозоль:вода в пределах от 1:2 до 2:1, так как при содержании алюмозоля менее соотношения 1:2 образования сплошной поверхностной пленки не происходило, а при соотношении более 2:1 всегда наблюдали образование сплошных дефектов покрытия с последующим его разрушением.

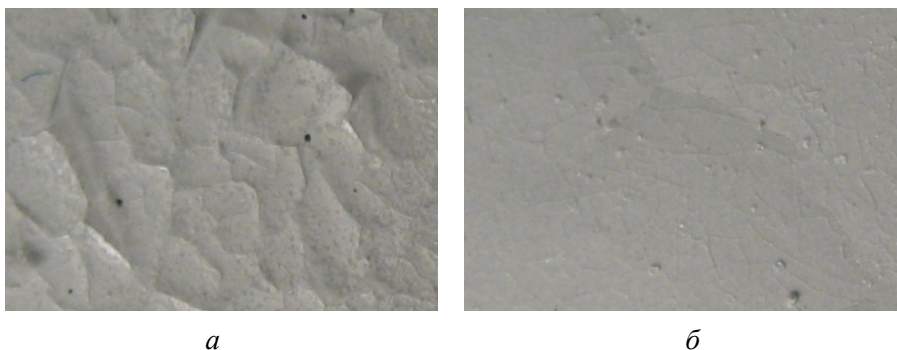


Рис. 1. Поверхность пленки оксида алюминия с дефектами (а) и без дефектов (б)

Наиболее важным параметром, определяющим процесс образования покрытия, является состояние поверхности перед нанесением раствора алюмозоля: сухая или влажная. В случае, когда поверхность литьевой керамики была сухой, раствор алюмозоля быстро впитывался, что позволяло нанести на поверхность большее количество материала за меньшее количество операций (рис. 2), однако, например, при трехслойном нанесении общая масса нанесенного материала на единицу поверхности была примерно одинакова.

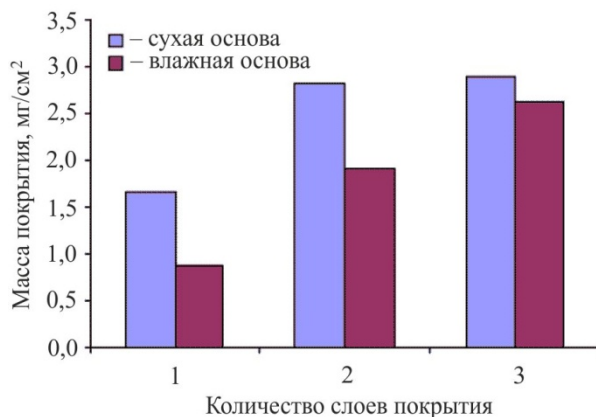


Рис. 2. Влияние состояния поверхности формы на количество нанесенного оксида алюминия при многослойном нанесении с использованием раствора алюмозоля с соотношением алюмозоль:вода = 1:2

Следует отметить, что в связи с быстрым впитыванием раствора алюмозоля сухой литьевой керамикой наблюдалась неравномерность толщины образовавшегося покрытия, что впоследствии могло привести к невозможности получения равномерного слоя покрытия на всей

внутренней поверхности литевой формы сложной конструкции и увеличивало бы вероятность образования локальных дефектов. По этим причинам впоследствии в основном использовали образцы, полученные нанесением раствора алюмозоля на влажную поверхность литевой керамики.

На рис. 3 показано влияние концентрации алюмозоля на массу получаемого покрытия на поверхности влажной литевой керамики. Как видно на рисунке, масса пленки оксида алюминия увеличивается не только с увеличением количества слоев покрытия, но и с увеличением концентрации алюмозоля. Однако следует отметить, что вне зависимости от количества слоев все образцы, полученные нанесением раствора с соотношением алюмозоль:вода = 1,5:1, имели дефекты покрытия, что, вероятно, было связано с большей скоростью роста покрытия и высокой вероятностью образования локальных неравномерностей покрытия, как и в случае с сухой основой, поэтому в дальнейших работах использовались растворы алюмозоля с соотношением алюмозоль:вода, равным 1:2 и 1:1,5. При этом анализ результатов показал, что критической толщиной покрытия является 7–9 мкм, при превышении которой весьма высока вероятность образования дефектов. О достаточности данной толщины покрытия для предотвращения образования α -слоя можно будет судить только после проведения исследований процесса литья.

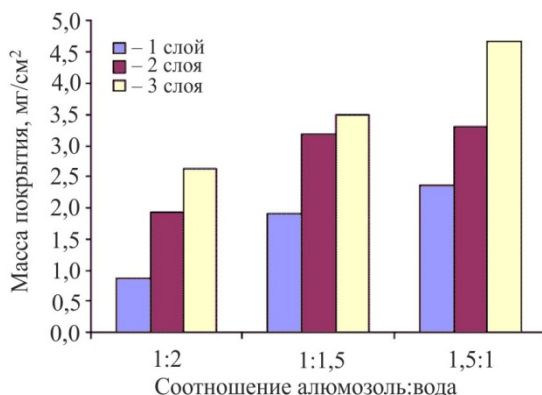


Рис. 3. Влияние соотношения алюмозоль:вода и количества слоев при многослойном нанесении на массу образованного покрытия на влажной поверхности литевой керамики

Таким образом, на основании результатов выполнения первого этапа можно сделать следующие выводы:

1. Для создания равномерного покрытия на поверхности литевой керамики, особенно сложной формы, ее следует предварительно увлажнять.

2. С целью нанесения на поверхность керамики бездефектного покрытия оксида алюминия рекомендуется использовать растворы алюмозоля с соотношением алюмозоль:вода=1:2 или 1:1,5, причем нанесение покрытия производить многослойно.

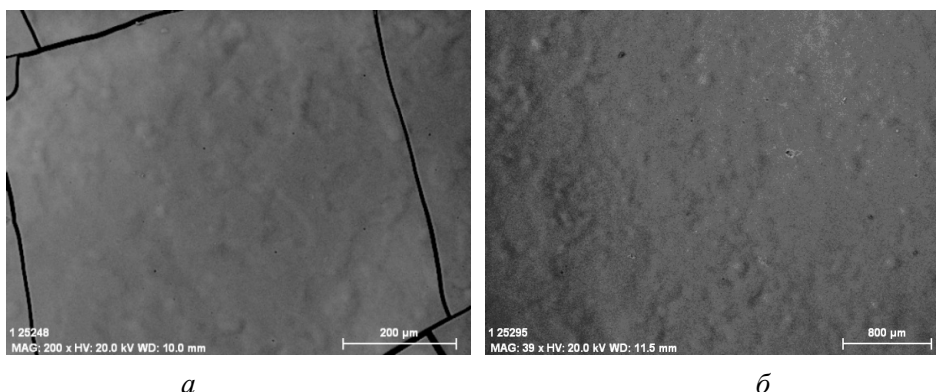
3. Критической толщиной покрытия является 7–9 мкм, при превышении которой весьма высока вероятность образования дефектов. О достаточности данной толщины покрытия для предотвращения образования α -слоя можно будет судить только после проведения исследований процесса литья.

При выполнении второго этапа работ основная цель состояла в модификации образованного из алюмозоля слоя оксида алюминия посредством внесения в его состав максимального количества инертных к титану оксидов, которое определялось концентрацией иттрия и лантана в поверхностной пленке, измеренной с помощью СЭМ, с последующим пересчетом результатов анализов на оксиды.

В ходе проведения работы было обнаружено, что внесение дополнительных веществ значительно влияет на наличие дефектов слоя покрытия литевой керамики из оксида алюминия. Особенно это проявлялось у образцов с пропиткой нитратом иттрия, в ходе термической обработки которого образовывался оксид иттрия. Для данной соли дефекты покрытия проявлялись в виде трещин шириной 5–10 мкм (рис. 4, а), наличие которых существенно не влияло на качество покрытия, так как последующего разрушения покрытия не происходило, а размер дефектов был соизмерим с размером зерен на лицевой поверхности литевой формы без покрытия. Подобных дефектов покрытия при использовании нитрата лантана не наблюдалось (рис. 4, б).

Результаты измерения количества внесенных нитратов иттрия и лантана, а следовательно, их оксидов, образованных при термической обработке, представлены на рис. 5.

Как видно на рис. 5, концентрация оксидов в пленке покрытия практически не зависит от соотношения алюмозоль:вода, использованного при ее создании. При этом концентрация оксида лантана значительно превышает концентрацию оксида иттрия даже при однократной пропитке, однако при двукратной пропитке солями лантана проявились критические дефекты покрытия, приведшие к его разрушению.



а

б

Рис. 4. Вид дефектов на поверхности образцов с оксидом иттрия (а) и оксидом лантана (б)

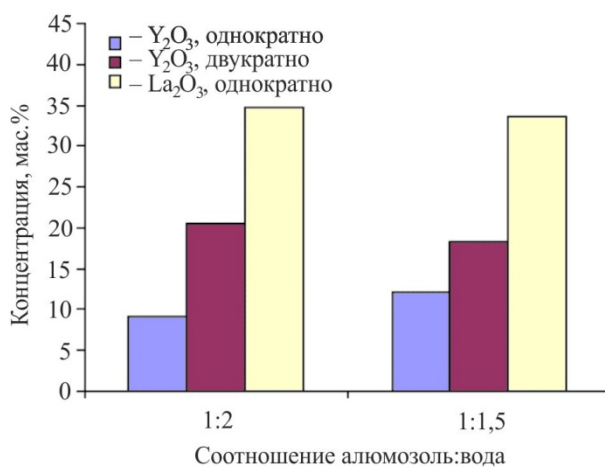


Рис. 5. Зависимость концентрации оксидов иттрия и лантана от способа их нанесения и параметров слоя оксида алюминия

Напротив, количество пропиток солями иттрия увеличивало концентрацию оксида иттрия, но никак не повлияло на количество дефектов покрытия и их выраженность, что может быть связано как с его меньшей концентрацией, так и с иным расположением оксида иттрия в поверхностной пленке, нежели оксида лантана.

Таким образом, на основании результатов выполнения второго этапа можно сделать следующие выводы:

1. Для пропитки поверхностного слоя оксида алюминия, полученного из алюмозоля, можно использовать нитраты иттрия и лантана, причем использование солей лантана предпочтительнее, так как их использование приводит к большей поверхностной концентрации инерт-

ного к титану оксида лантана за меньшее количество операций, нежели оксида иттрия.

2. Использование двойной пропитки нитратом лантана поверхностного слоя недопустимо.

3. Концентрация инертных к титану оксидов в поверхностном слое практически не зависит от способа ее создания, поэтому следует использовать способ, позволяющий создать из алюмозоля слой с минимальным количеством дефектов.

Заключение. Проведенные исследования позволили определить особенности операций создания бездефектного лицевого слоя из оксида алюминия, модифицированного инертными к титану оксидами непосредственно внутри существующей литейной формы, и определить условия их проведения:

1. Для создания с использованием алюмозоля бездефектного покрытия оксида алюминия на внутренней поверхности литейной формы следует использовать раствор алюмозоля с соотношением алюмозоль:вода=1:2 или 1:1,5 с многократным нанесением и промежуточной сушкой (до трех слоев), а поверхность формы перед нанесением раствора необходимо увлажнять.

2. Критической толщиной покрытия является 7–9 мкм, при превышении которой весьма высока вероятность образования дефектов. О достаточности данной толщины покрытия для предотвращения образования α -слоя можно будет судить только после проведения исследований процесса литья.

3. Для внесения в объем покрытия инертного к титану оксида можно использовать растворы нитратов иттрия или лантана, причем концентрация инертных к титану оксидов в поверхностной пленке практически не зависит от способа ее создания, поэтому следует использовать способ, позволяющий создать из алюмозоля пленку с минимальным количеством дефектов.

Список литературы

1. Ламзина И.В., Тарасов А.П., Желтобрюхов В.Ф. Разработка технологии процесса нейтрализации травильных растворов металлургических производств // Вестник БГУ. – 2016. – № 4. – С. 9–15.

2. Бибииков Е.Л., Ильин А.А. Литье титановых сплавов. – М.: Альфа-М, 2014. – 314 с.

3. 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. – 2012. – InTech. – P. 29–42.

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

5. Научно-технический центр Компас [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.compass-kazan.ru/alumozol.php> (дата обращения: 17.06.2020).

6. Научно-технический центр Компас [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.compass-kazan.ru/kremnezoli.php> (дата обращения: 17.06.2020).

7. Разработка технологии создания химически стойких покрытий лицевого слоя форм для литья титановых сплавов / М.Н. Никитченко, А.В. Тиунова, Д.В. Саулин, С.А. Смирнов, В.З. Пойлов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2. – С. 347–351.

8. Особенности технологии изготовления высокоогнеупорных керамических форм для получения отливок из γ -TiAl сплавов / Л.И. Рассохина, О.Н. Битюцкая, М.В. Гамазина, А.С. Кочетков // Труды ВИАМ. – 2020. – Вып. 2 (86). – С. 31–40.

9. Тиунова А.В., Саулин Д.В., Пойлов В.З. Разработка технологии создания неорганических пленок заданного состава на поверхности материалов с использованием алюмозоля // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – Т. 4. – С. 178–182.

10. Спектор Ю.Е., Еромасов Р.Г. Технология нанесения и свойства покрытий: курс лекций. – Красноярск, 2008. – 271 с.

11. Орлов Н.С. Ультра- и микрофльтрация: учеб. пособие / РХТУ им. Менделеева. – М., 2014. – 117 с.

12. Мембранная технология [Электронный ресурс]. – URL: <http://adymis.com/templates/adymis/MEMBRAFLOW.pdf> (дата обращения: 13.12.2019).

13. Перих Е.Ю., Исакова И.В. Стекловолоконистые катализаторы на службе экологии и охраны окружающей среды [Электронный ресурс]. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Ecoprom/2018/egpp/pages/Articles/433.pdf> (дата обращения: 13.03.2020).

14. Стекловолоконистые тканевые катализаторы [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.chemphyst.com/ru/produkty-i-uslugi/steklovoloknistye-tkanye-katalizatory.html> (дата обращения: 13.12.2019).

15. Газоаналитическая мультисенсорная система на основе термokatалитических датчиков [Электронный ресурс]. – URL: <http://sstu.ru/files/ftf/docs/Lashkov.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).

References

1. Lamzina I.V., Tarasov A.P., Zheltobryuhov V.F. Razrabotka tekhnologii processa nejtralizacii travil'nyh rastvorov metallurgicheskikh proizvodstv [Development of technology for the process of neutralization of pickling solution of metallurgical production]. *Vestnik BGU*, 2016, no. 4, pp.9-15.
2. Bibikov E. L., Ilyin A. A. Lit'e titanovykh splavov [Casting of titanium alloys]. Moscow, Alfa-M, 2014, 314 p.
3. 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*, 2012, InTech, pp. 29-42.
4. Nikitchenko M.N., Semukov A.S., Saulin D.V., Yaburov A.Yu. Izuchenie termodinamicheskoi vozmozhnosti vzaimodeistviia materialov lit'evoi formy s metallom pri lit'e titanovykh splavov [Study of thermodynamic possibility of interaction of cast form materials with metal during casting of titanium alloys]. *Vestnik PNIPU. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija*, 2017, no. 4, pp. 249-263.
5. Nauchno tekhnicheskii tsentr Kompas [Scientific and technical center Compass], available at: <http://www.compass-kazan.ru/alumozol.php> (accessed 17 June 2020).
6. Nauchno tekhnicheskii tsentr Kompas [Scientific and technical center Compass], available at: <http://www.compass-kazan.ru/kremnezoli.php> (accessed 17 June 2020).
7. Nikitchenko M.N., Tiunova A.V., Saulin D.V., Smirnov S.A., Poylov V.Z. Razrabotka tekhnologii sozdaniia khimicheskii stoikikh pokrytii litsevo sloia form dlia lit'ia titanovykh splavov [Development of technology for creating chemically resistant coatings of the front layer of forms for casting titanium alloys]. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2019, vol. 2, pp. 347-351.
8. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Kochetkov A.S. Osobennosti tekhnologii izgotovleniia vysokoogneupornykh keramicheskikh form dlia polucheniia otlivok iz γ -TiAl splavov [Features of manufacturing technology of highly refractory ceramic forms for obtaining castings from γ -TiAl alloys]. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), pp. 31-40.
9. Tiunova A.V., Saulin D.V., Poylov V.Z. Razrabotka tekhnologii sozdaniia neorganicheskikh plenok zadannogo sostava na poverkhnosti materialov s ispol'zovaniem aliumozolia [Development of technology for creating inorganic films of a given composition on the surface of materials using alumosol]. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2020, vol. 4, pp. 178-182.
10. Spektor Yu.E., Eromasov R.G. Tekhnologiya naneseniia i svoistva pokrytii [Coating technology and properties]. Krasnoyarsk, 2008. 271 p.
11. Orlov N.S. Ul'tra- i mikrofil'tratsiia: uchebnoe posobie [Ultra-and micro-filtration: a textbook]. Moscow, RKhTU im. Mendeleeva, 2014. 117 p.

12. Membrannaia tekhnologiia [Membrane technology-access], available at: <http://adymis.com/templates/adymis/MEMBRAFLOW.pdf> (accessed 17 June 2020).

13. Perikh E.Yu., Isakova I.V. Steklovoloknistye katalizatory na sluzhbe ekologii i okhrany okruzhaiushchei sredy [Fiberglass catalysts in the service of ecology and environmental protection], available at: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Есoprom/2018/egpp/pages/Articles/433.pdf> (accessed 13 March 2020).

14. Steklovoloknistye tkanevye katalizatory [Fiberglass fabric catalysts-access], available at: <http://www.chemphyst.com/ru/produkty-i-uslugi/steklovoloknistye-tkanye-katalizatory.html> (accessed 17 June 2020).

15. Gazoanaliticheskaiа mul'tisensornaia sistema na osnove termokataliticheskikh datchikov [Gas-Analytical multi-sensor system based on thermocatalytic sensors], available at: <http://sstu.ru/files/ftf/docs/Lashkov.pdf> (accessed 17 June 2020).

Получено 16.07.2020

Об авторах

Тиунова Анастасия Валерьевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: AnastasiaTiunova@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).

About authors

Anastasia V. Tiunova (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: AnastasiaTiunova@mail.ru).

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