УДК 677.05
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_270

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЛЬЕРНОГО ПИТАТЕЛЯ АГРЕГАТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛЯННЫХ НИТЕЙ

MATERIAL SELECTION FEATURES FOR THE MANUFACTURE OF A SPINNERET FEEDER FOR GLASS FILAMENT PRODUCTION UNIT

О.С. ЖУРАВЛЕВА, Е.Н. ХОЗИНА, П.А. КОРОЛЕВ, А.А. ЧЕЛОМОВ

O.S. ZHURAVLEVA, E.N. KHOZINA, P.A. KOROLEV, A.A. CHELOMOV

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)),

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: zhuravleva-os@rguk.ru

В настоящее время для изготовления тканей технического назначения широко используются минеральные нити и волокна, технология изготовления которых требует применения для изготовления узлов технологического оборудования материалов с особыми свойствами. Целью данной работы является систематизация и анализ информации о перспективных конструкционных материалах для изготовления одного из важнейших и дорогостоящих элементов агрегата для получения стеклянных нитей – фильерного питателя, от работы которого во многом зависит качество вырабатываемой продукции. В статье приводятся результаты теоретического исследования возможности применения различных инновационных материалов для изготовления указанного элемента. Особенности технологического процесса получения стеклянных нитей таковы, что фильерные питатели подверга-

ются высоким температурным воздействиям, а также воспринимают достаточно большие нагрузки от поступающего в них расплава. Эти факторы являются определяющими при выборе материалов для изготовления фильерных питателей. В работе осуществлен обзор и проведен сравнительный анализ пяти групп современных материалов: благородных металлов и их сплавов, композиций из слоев благородных и неблагородных металлов или сплавов и керамики, композиций из платиновых сплавов и керамики, сплавов на основе благородных металлов с добавлением рения, вольфрама, циркония и иттрия или мелкодисперсных неметаллических частиц, а также многослойных композиций из платины и ее сплавов с прослойками из неблагородных металлов и сплавов. Указанные материалы обладают свойствами жаропрочности, окалиностойкости, высокой электропроводности, химической стойкости и технологичности, позволяющими использовать их для изготовления ответственных элементов стеклоплавильного агрегата. Оценка и выбор оптимального материала осуществлялись на основе использования метода многокритериального отбора, причем учитывалась также экономическая составляющая. Проведенный анализ показывает, что, несмотря на широкий диапазон рекомендуемых в настоящее время конструкционных материалов, платина и платинородиевые сплавы по большинству критериев продолжают оставаться наиболее предпочтительными для использования в области получения стеклянных нитей. Однако с целью снижения стоимости материала можно рекомендовать использование слоистых композиционных дисперсно-упрочненных материалов. Результаты представленного в работе исследования могут быть полезны при поиске новых материалов для изготовления фильерных питателей с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

Currently, mineral filaments and fibers are widely used, the manufacturing technology of which requires the use of materials with special properties. The purpose of this work is to systematize and analyze information about prospective structural materials for the manufacture of one of the most important and expensive elements of the glass thread production unit, the spinneret feeder, which largely determines the quality of the products produced. The article presents the results of a theoretical study of the possibility of using various innovative materials for the manufacture of the mentioned element. The technological process for producing glass filaments requires spinnerets to be exposed to high temperatures and to withstand considerable loads from the melt entering them. These factors are crucial when choosing materials for the manufacture of spinneret feeders. The paper provides a review and comparative analysis of five groups of modern materials: noble metals and their alloys, compositions from layers of noble and base metals or alloys and ceramics, compositions from platinum alloys and ceramics, alloys based on noble metals with the addition of rhenium, wolfram, zirconium and yttrium or finely dispersed non-metallic particles, as well as multilayer compositions of platinum and its alloys with layers of base metals and alloys. These materials have the properties of heat resistance, scale resistance, high electrical conductivity, chemical resistance and manufacturability, allowing them to be used for the manufacture of related elements of a glass melting unit. The evaluation and selection of the optimal material is based on the use of the multicriteria selection method, and the economic component was also taken into account. The analysis shows that, despite the wide range of currently recommended structural materials, platinum and platinum-rhodium alloys continue to be the most preferred for use in the production of glass filaments according to most criteria.

However, in order to reduce the cost of the material, the use of layered composite dispersion-hardened materials can be recommended. The results of the research presented in this paper may be useful in the search for new materials for the manufacture of spinneret feeders with improved technical and economic characteristics.

Ключевые слова: стеклянные нити и волокна, фильерный питатель, благородные металлы и сплавы, дисперсно-упрочненные платиновые сплавы, слоистые композиционные дисперсно-упрочненные материалы, композиции из слоев металлов и керамики, жаропрочность, окалиностойкость, электропроводность, химическая стойкость, технологичность.

Keywords: glass filaments and fibers, spinneret feeder, noble metals and alloys, dispersed-hardened platinum alloys, layered composite dispersed-hardened materials, compositions of layers of metals and ceramics, heat resistance, scale resistance, electrical conductivity, chemical resistance, technological effectiveness.

Введение

Технологический прогресс постоянно требует создания и применения в промышленности инновационных материалов с уникальными заданными свойствами, такими как жаропрочность, высокая электропроводность, устойчивость к агрессивным средам и другие. Для получения таких материалов часто используют стеклянные нити и волокна, обладающие высокой термостойкостью и прочностью, низкой гигроскопичностью, стойкостью к воздействию агрессивных сред, сравнительно малой плотностью и рядом других значимых характеристик.

Рис. 1

Формование и выработка стеклянных нитей осуществляются различными способами, в частности, так называемым одностадийным способом на специальном стеклоплавильном агрегате (СПА), важнейшим рабочим элементом конструкции которого является фильерный питатель (рис. 1). Он ограничен фильерной пластиной с отверстиями, в которые вварены насадки различной формы, причем их число варьируется от 50 до 4000, а иногда и до 6000 штук (https://www.krastsvetmet.ru/products-and-services/industrial-appliances/catalog/bushings-and-glass-melters/description-fb-gm/ (дата обращения: 07.07.2025)) [1].

Особенности технологического процесса получения стеклянных нитей таковы, что фильерные питатели подвергаются высоким температурным воздействиям (от 1160° для выработки стекол марки E до 1565° для выработки стекол марки S [2]), а также воспринимают достаточно большие нагрузки от поступающего в них расплава (0,046 МПа [1]). Эти факторы являются определяющими при выборе материалов для изготовления фильерных питателей. Таким образом, потребность в материалах с высокой жаропрочностью, электропроводностью и химической стойкостью определяет необходимость систематизации и анализа информации о перспективных материалах для изготовления фильерного питателя.

В настоящее время чаще всего для изготовления питателей используется платина (*Pt 99,93*; …). Гистограмма (рис. 2) характеризует спрос на платину по сферам применения. Как видно из гистограммы, стекольная промышленность, а именно фильеры для формования стеклянных нитей, занимает второе место по применимости платины [3].

Рис. 2

Несмотря на наличие существенных преимуществ, платина обладает серьезным недостатком – высокой стоимостью: она входит в восьмерку самых дорогих металлов на планете, ее стоимость достигает в среднем 4000 руб. за 1 грамм. В целях создания экономичных композиций с заданными эксплуатационными и технологическими свойствами для изготовления фильерных питателей в некоторых случаях легируют платину какими-либо другими благородными, но менее дорогостоящими металлами, например, палладием и родием (*PtRh 95-5*; *PtRh 70-30*; *Pd 99,9*; *PtRh30* и др.). В табл. 1 показан химический состав некоторых марок платинородиевых сплавов [4].

Таблица 1

Марка	Массовая доля, %			
	Pt	Rh	Сумма Pd, Ir, Au	Fe
PtRh5	94,7...95,3	4,7...5,3	0,15	0,04
PtRh7	92,7...93,3	6,7...7,3		
PtRh10	89,7...90,3	9,7...10,3		
PtRh20	79,6...80,4	19,6...20,4		
PtRh30	69,5...70,5	29,5...30,5		

Такие сплавы обладают высокими температурами плавления (температура плавления платины составляет 1768°С, палладия – 1552°С, родия – 1963°С, тогда как температура плавления стекла не превышает 1300°С), характеризуются высокой плотностью (плотность платины, палладия и родия составляет соответственно 21,45 г/см^3, 12,02 г/см^3 и 12,41 г/см^3) и коррозионной стойкостью, в том числе и в агрессивных средах, что имеет большое значение для процесса стеклопрядения [5].

Оптимальная доля родия в сплаве для изготовления фильерных питателей зависит от технологического процесса получения стеклянных нитей. При использовании одностадийного способа применяют сплав с долей родия порядка 20% (см. табл. 1). Он отличается сочетанием высокой жаропрочности и технологичности, однако добавка родия к платине увеличивает инертность данного сплава по сравнению с платиной и родием по отдельности, что оказывает негативное влияние на переработку таких сплавов.

Палладий является весьма слабым упрочнителем платины, а легирование палладием двойных платинородиевых сплавов понижает их жаропрочность. Однако палладий является менее дефицитным и более дешевым материалом, чем обусловлено его широкое применение при создании экономичных платиновых сплавов для работы при средних температурах (1200°…1500° С).

Таким образом, платина является наиболее предпочтительным материалом с точки зрения физико-механических и физико-химических характеристик, однако обладает существенным недостатком – чрезмерно высокой стоимостью. Легирующие добавки родия и палладия позволяют значительно уменьшить стоимость фильерного питателя, но могут приводить к возникновению химических реакций между расплавом стекла и поверхностью фильеры, а также снижать жаропрочность сплава. Следовательно, поиск новых материалов с улучшенными характеристиками является достаточно актуальной задачей, требующей разработки комплексного подхода к ее решению, что и предлагается в данной работе.

Методы

Выбор оптимального конструкционного материала для изготовления фильерного питателя можно рассматривать как оптимизационную задачу о многокритериальной оценке и последующем выборе определенных физико-механических, физико-химических и других параметров материала, ко-

торые в той или иной степени удовлетворяют условиям поставленной задачи отбора единственного из множества возможных [6, 7]. Многокритериальный отбор предполагает наличие определенных критериев выбора характеристик материала фильерного питателя. Критерии, по которым рекомендуется осуществлять выбор конструкционного материала, представлены на рис. 3.

Проведенный обзор современной научно-технической литературы выявил несколько предложений по использованию различных инновационных конструкционных материалов для изготовления элементов СПА. На рис. 4 представлена схема, иллюстрирующая группы материалов, уже применяемых в настоящее время для изготовления элементов СПА, а также рекомендуемых к применению.

Рис. 3

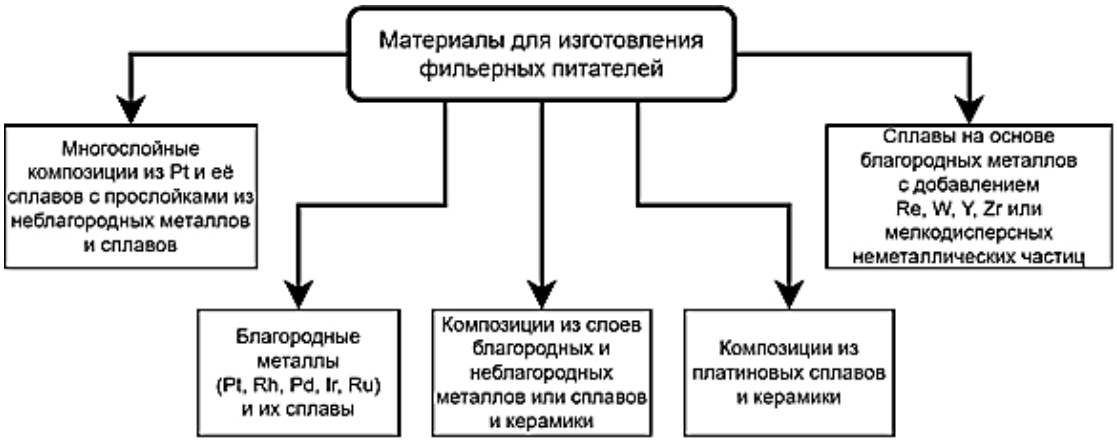

Рис. 4

Осуществим сравнительный анализ и оценку различных конструкционных материалов для изготовления фильерного питателя по приведенным выше критериям.

Важно учитывать, что фильерный питатель работает в неблагоприятных условиях, поскольку на него, с одной стороны, воздействует расплав стекла, имеющий достаточно высокую температуру, а с другой – оказывает влияние воздушная атмосфера, а иногда еще и подфильерный холодильник. Таким образом, влияние температуры весьма сложное, поскольку кроме чисто физического воздействия температура, особенно в области достаточной атомной подвижности, т. е. при температурах, довольно близких к температурам размягчения и плавления, вызывает различные физико-химические процессы. Они иногда могут влиять на механические свойства гораздо сильнее, чем собственно изменение температуры как таковое [8].

Анализ условий эксплуатации фильерных питателей показал, что основным фактором, определяющим срок службы платины и ее сплавов в рассматриваемых устройствах, является жаропрочность, под которой понимается стойкость сплава к разрушению и деформации под влиянием высоких температур и нагрузок. Причем проведенные исследования показывают, что величины жаропрочности платины и сплавов на ее основе в воздушной среде и в

расплаве различны, однако существует некоторая корреляционная связь высокотемпературной коррозионной стойкости рассматриваемых материалов в расплаве и на воздухе с установившейся скоростью ползучести, что следует принимать во внимание при проектировании фильерных питателей для получения стеклянных нитей.

Важно учитывать и такой параметр конструкционного материала, как тугоплавкость, которая характеризуется сравнительно высокой температурой плавления (выше 2000°) и износостойкостью, что позволяет обеспечивать жаропрочность конструкции даже при очень высоких температурах.

Известно, что наряду с родием и палладием, широко применяемыми в настоящее время, для легирования платиновых сплавов могут использоваться и другие благородные металлы, в частности, иридий и рутений, т. к. платина легко сплавляется с ними. Легирование иридием способствует увеличению твердости и прочности получаемого сплава, а также повышению его химической инертности и жаропрочности, а рутений позволяет увеличить коррозионную стойкость.

Достаточно интересны сплавы платины с золотом, т. к. оно сильно уменьшает смачивающую способность благородных сплавов расплавами стекла, вследствие чего эти сплавы улучшают эксплуатационные характеристики фильерных узлов стеклоплавильных сосудов [9]. Легирование золотом также влияет на твердость и удельное электросопротивление платины: обе характеристики возрастают по мере легирования, причем электросопротивление линейно, а твердость при содержании золота до 6% растет линейно, а при 20% изменяется незначительно [10].

Исследование многокомпонентных платиновых сплавов в системе *Pt – Rh – Pd – Ru – Ir – Au* в расплаве и на воздухе позволяет расположить указанные элементы в ряд эффективности по степени их упрочняющего действия в платиновом твердом растворе (при температурах эксплуатации стеклоплавильных агрегатов 1200…1700°С) следующим образом: родий, иридий, рутений, золото (металлы расположены по степени снижения упрочняющего эффекта).

Таким образом, фильерные питатели из платины, легированной благородными металлами, могут иметь место, поскольку будут отличаться высокими значениями твердости и прочности, а главное, будут характеризоваться увеличенной жаропрочностью, что является в данном случае необходимым критерием при выборе конструкционного материала. Однако стоимость таких сплавов все равно остается сравнительно высокой.

С целью снижения цены материала на основе платины могут быть созданы сплавы с высокоплавкими, жаропрочными и обладающими хорошей технологичностью неблагородными металлами, такими как тантал *Ta*, титан *Ti*, рений *Re*, ниобий *Nb* и вольфрам *W*, уровень жаропрочности которых при 1300°…1500° С в несколько раз превосходит жаропрочность основы. Например, по уровню жаропрочности сплавы с 5% Re и 5% Ta почти в 2 раза превосходят известный сплав PtRh7 и лишь незначительно уступают сплаву PtRh10. По термостойкости и летучести платиновые сплавы, легированные неблагородными металлами, не уступают нелегированной платине.

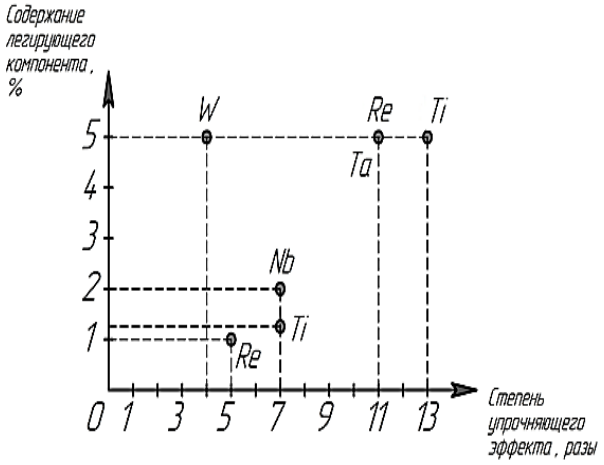

Рис. 5

На основании данных, приведенных в [11], разработана номограмма (рис. 5), иллюстрирующая степень упрочняющего эффекта различных неблагородных легирующих металлов (*Ta, Ti, Re, Nb, W*) в зависимости от их процентного содержания в платиновом сплаве.

Проведенные исследования [12] показали, что применение упрочненной неблагородными легирующими агентами платины при производстве стеклянных нитей позволит получить значительный экономический эффект за счет продления срока службы стеклоплавильных агрегатов, снижения их себестоимости, а также обеспечения более высоких температур при их эксплуатации. Оптимальными по комплексу свойств можно считать платиновые сплавы, содержащие 5% *Ta*; 1,3% *Ti*; 1% и 5% *Re*; 0,047% *Nb*; 1% *W*.

С целью повышения сопротивления ползучести и механической прочности материалов на основе платиновых металлов проводились экспериментальные исследования возможности их упрочнения дисперсными неметаллическими частицами [13, 14].

Дисперсно-упрочненные платиновые сплавы (ДУПС) – это композиционные материалы на основе платины или ее сплавов, в объеме которых распределены высокодисперсные частицы вторых фаз, практически не взаимодействующие с матрицей. Упрочнение осуществляется равномерно распределенными в объеме металла инертными дисперсными частицами размером менее 0,1 мкм с расстоянием между ними не более 0,5 мкм при содержании упрочняющей фазы до нескольких объемных процентов. Наибольшее упрочнение сплава достигается при объемной концентрации дисперсных частиц 15 %.

В работе [13] представлены результаты разработки композиционного материала *ZGS-Pt* (*Zirconia grain stabilized*), в котором в качестве дисперсной фазы используют сравнительно мелкие частицы окиси циркония в очень малых концентрациях (менее 0,5% объемн.). Для платины с добавкой ZrO_2 при 1400° С и напряжении 5 МПа время до разрушения превышает 3000 ч, что в десятки раз больше, чем у традиционного сплава *PtRh10*.

Дисперсное упрочнение платины и ее сплавов достигается также путем введения частиц карбидов, нитридов, боридов и оксидов. Сравнение характеристик традиционных платинородиевых сплавов с аналогичными сплавами, содержащими мелкодисперсные частицы, проведенное для сплавов с одинаковым содержанием родия (10%) [14], подтверждает повышенную прочность последних.

В случае использования ДУПС для изготовления пластин фильерных питателей может увеличиться срок службы СПА. Кроме того, появится возможность получать пластины с большим количеством фильер (4000…6000 шт.), а также значительно снизить толщину деталей оснастки для выработки оптических стекол без уменьшения их прочности, что позволит сократить потребность в драгоценных металлах в 1,5…2,0 раза [14].

В стеклоплавильном производстве используются и другие виды композиционных материалов, а именно слоистые композиционные дисперсно-упрочненные материалы – СКМ^{ТМ} [15]. Они представляют собой материал, образованный чередующимися слоями платины или платинового сплава и прослойками из ДУПС. Варьируя соотношение слоев платинового сплава и прослоек, можно получать слоистые материалы, имеющие широкий спектр заданных свойств.

Ряд практических задач, связанных с повышением долговечности СПА и уменьшением безвозвратных потерь платиновых металлов при их высокотемпературной эксплуатации, может решаться при нанесении на поверхность изделий специального керамического защитного покрытия. По сравнению с легированием этот способ является менее затратным. Так, создание методом плазменного напыления покрытий толщиной в сотни микрон из Al_2O_3, ZrO_2 на поверхности плавильных аппаратов показало возможность снижения потерь платиновых металлов до 15…25% и повышения сроков службы элементов СПА за счет улучшения таких эксплуатационных качеств, как прочность, сопротивляемость механическому воздействию и устойчивость в условиях агрессивных сред. Это становится возможным благодаря уникальному сочетанию высоких показателей твердости и низкой стоимости оксида алюминия и исключительной механической прочности, высокой из-

носостойкости и химической стабильности циркония [16].

Все чаще для изготовления элементов СПА рекомендуют к применению сложные композиции из слоев благородных и неблагородных металлов или сплавов и керамики. Однако, как показала практика, керамика не справляется с агрессивностью расплава стекла, что проявляется в вымывании расплавом каналов фильер и в дальнейшем приводит к искажению их геометрических характеристик (короблению).

С целью замены дорогостоящих платинородиевых сплавов менее дефицитными и более дешевыми материалами предлагаются хромистые сплавы, на поверхности которых образуется защитная пленка из оксидов хрома и других легирующих элементов, например *10Х25ТЛ*, имеющий следующий химический состав: *C* = 0,1…0,2%; *Si* = 0,5…1,2%; *Mn* = 0,5…1,8%; *Cr* = = 23…27%; *Ti* = 0,1…0,8%; *S* и *P* не более 0,03% и 0,035% соответственно [17]. Такая пленка способна предохранять сплав от взаимодействия с расплавом.

Результаты и обсуждения

В табл. 2 приведены физико-механические характеристики различных материалов, применяемых для изготовления фильерных питателей.

Анализ табл. 2 позволяет отметить, что платина и ее сплавы с родием и палладием удовлетворяют всем необходимым и достаточным критериям выбора конструкционного материала для изготовления элементов СПА, а их стоимость является основным тормозом широкого применения указанных металлов и сплавов в различных отраслях машиностроения.

Таблица 2

Характеристика		PtRh10	ДУПС на основе Pt	ДУПС на основе PtRh10	СКМ
Температура плавления, ° С		1860	1400…1500	< 1500	>1200
Коррозионная стойкость		Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Химическая инертность		Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Твердость, МПа (НВ)		130…190	160…220	-	≈ 115
Предел прочности, МПа		380…620	-	-	350…580
Стоимость за грамм, руб.		≈ 4000	< 4000	< 4000	< 4000
Термостойкость при 1200…1400°С (число циклов до разрушения)		393	105	480	717
Предел 1000-часовой длительной прочности σ_{1000}, МПа	1200°С	5	21	40	7
	1400°С	2,5	-	23	4
Время до разрушения t, ч	10 МПа 1400°С	7	-	> 10^5 (расч.)	11
Скорость ползучести ε, %/ч	5 МПа 1400°С	0,2	-	< $2\cdot10^4$	0,07
Длительная пластичность δ, %	1200°С	35-40	< 1,5	< 1,5	35
	1400°С		-	< 1,5	39

Незначительно отличаясь от платины по своим физико-химическим свойствам, ДУПС в сотни раз превышает ее по жаропрочности и лишь незначительно уступает ей по обрабатываемости давлением. В связи с этим изготовление фильерного питателя из ДУПС на основе платины и ее сплавов может быть более простым, чем из некоторых промышленных сплавов.

Важным достоинством СКМ является его высокая технологичность при сварке плавлением, что позволяет применять его для деталей корпуса стеклоплавильного агрегата. Таким образом, использование СКМ отличается высокой эффективностью и экономичностью.

Следует отметить, что в настоящее время попытки заменить платинородиевые сплавы при изготовлении элементов СПА другими материалами остаются малоэффективными вследствие сложности технологического процесса получения стеклянных нитей, предъявляющего к материалам очень высокие требования: жаростойкость,

термостойкость, окалиностойкость, высокая электропроводность, химическая стойкость по отношению к расплавам стекла при температурах 1200…1400°С, а также наличие технологических характеристик, обеспечивающих изготовление деталей сложной конфигурации. В связи с этим продолжаются работы по поиску экономичных инновационных материалов, способных обеспечить выполнение всех указанных требований.

ВЫВОДЫ

1. Проведена систематизация и обработка научно-технической информации о конструкционных материалах, которые могут быть использованы при изготовлении фильерного питателя СПА.

2. Разработана методика оценки и выбора оптимального конструкционного материала для изготовления элементов СПА на основе решения задачи о многокритериальном отборе, где все критерии разделены на три группы: необходимые, достаточные и желательные.

3. Проведен сравнительный анализ различных конструкционных материалов, обладающих свойствами жаропрочности, окалиностойкости, высокой электропроводности, химической стойкости и технологичности, позволяющими использовать их для изготовления фильерных питателей СПА вместо традиционной дорогостоящей платины и ее сплавов.

4. На основе проведенного анализа разработана номограмма, позволяющая оценить степень упрочняющего эффекта различных неблагородных легирующих металлов в зависимости от их процентного содержания в платиновом сплаве.

5. С целью снижения стоимости материала для изготовления фильерного питателя рекомендуется использовать слоистые композиционные дисперсно-упрочненные материалы, которые по своим физико-механическим свойствам очень близки к платиновым сплавам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Канатов А.В., Федоров Э.В., Виноградов Н.А. и др.* Исследование и расчет дна фильерного питателя волнообразной формы стеклоплавильного аппарата // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 1 (397). С. 253…259.

2. *Вавилова М.И., Кавун Н.С.* Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 33…37.

3. *Hughes A.E., Haque N., Northey S.A., Giddey S.* Platinum group metals: A review of resources, production and usage with a focus on catalysts // Resources. 2022. Т. 10, № 9. P. 93.

4. *Fan X., Tang M., Wu X., Luo S.* SnO_2 patched ultrathin PtRh nanowires as efficient catalysts for ethanol electrooxidation // Journal of Materials Chemistry A. 2019. Т. 7. №. 48. P. 27377…27382.

5. *Егошина А.В.* Совместное определение платины и родия в сплавах методом инверсионной вольтамперометрии на модифицированных графитовых электродах: дис. … канд. хим. наук. Томск, 2024. 96 с.

6. *Хозина Е.Н., Журавлева О.С., Королев П.А., и др.* Рекомендации по выбору вида ткацкого оборудования для выработки технических тканей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 1 (397). С. 260…265.

7. *Nelyubin A., Podinovskiy V., Potapov M.* Methods of criteria importance theory and their software implementation // Computational Aspects and Applications in Large-Scale Networks. 2018. Vol. 247. P. 189…196.

8. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч. 1. М.: Машиностроение, 1974. С. 236.

9. *Рытвин Е.И.* Платиновые металлы и сплавы в производстве стеклянного волокна. М.: Химия, 1974. 264 с.

10. *Васильева Е.В., Волкова Р М. и др.* Платина, ее сплавы и композиционные материалы. – https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/platina-ee-splavy-i-kompozitsionnye-materialy (дата обращения: 08.07.2025).

11. Благородные металлы и их заменители. Свердловск, 1971. Вып. 28. 259 с.

12. *Мурзагареев Т.Г.* Структура и свойства сплавов платины и родия. – https://fizmathim.com/read/572087%20/a?#?page=1 (дата обращения: 08.07.2025).

13. *Логинов Ю.Н., Фомин А.А.* Влияние эффекта дисперсного упрочнения платинородиевого сплава на характеристики упрочнения. – URL: chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/33179/1/itvmim_2012_11.pdf (дата обращения: 10.07.2025).

14. *Васекин В.В., Морозова Л.Э., Ястребов В.А.* Композиционные материалы на основе платиновых сплавов: производство и применение // XX Черняевская конференция по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – URL: http://conf.sfu-kras.ru/conf/chernyaev2013/report? memb_id=7983, свободный. (дата обращения: 10.07.2025).

15. *Кутенева С.В., Гладковский С.В., Недзвецкий П.Д., Черкасова Т.С.* Свойства и структура слоистых металлополимерных композитов в условиях динамического и циклического нагружения // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Томск: ТГУ, 2021. С. 212…213.

16. *Рафальский И.В., Руленков А.Д., Девойно О.Г.* Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3- *Al* // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 88…93.

17. *Зяблицев К.В., Игнатов М.Н., Огарышев С.И.* Конструкция питателей для выработки расплава. – URL: http://iii04.pfo-perm.ru/Data2003/ziablic/ziablic.htm (дата обращения: 10.07.2025).

R E F E R E N C E S

1. *Kanatov A.V., Fedorov E.V., Vinogradov N.A. etc.* The research and calculation of the stream feeder assembly bottom of the wavy form for the glass-melting machine // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 1 (397). Pp. 253…259.

2. *Vavilova M.I., Kavun N.S.* Properties and features of reinforcing glass fillers used for the manufacture of structural fiberglass // Aviation Materials and Technologies. 2014. № 3. P. 33…37.

3. *Hughes A.E., Haque N., Northey S.A., Giddey S.* Platinum group metals: A review of resources, production and usage with a focus on catalysts // Resources. 2022. T. 10. № 9. P. 93.

4. *Fan X., Tang M., Wu X., Luo S.* SnO_2 patched ultrathin PtRh nanowires as efficient catalysts for ethanol electrooxidation // Journal of Materials Chemistry A. 2019. T. 7, №. 48. P. 27377…27382.

5. *Egoshina A.V.* Simultaneous determination of platinum and rhodium in alloys by inversion voltammetry using modified graphite electrodes: dis….cand. of chem. Sciences. Tomsk, 2024. 96 p.

6. *Khozina E.N., Zhuravleva O.S., Korolev P.A. и др.* Recommendations for choosing the type of weaving equipment for production of technical fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 1 (397). P. 260…265.

7. *Nelyubin A., Podinovskiy V., Potapov M.* Methods of criteria importance theory and their software implementation // Computational Aspects and Applications in Large-Scale Networks. 2018. Vol. 247. P. 189…196.

8. *Friedman Ya.B.* Mechanical properties of metals. In 2 parts. Part 1. Moscow: Mashinostroenie, 1974. P. 236.

9. *Rytvin E.I.* Platinum metals and alloys in glass fiber production. Moscow: Chemistry, 1974. 264 p.

10. *Vasileva E.V., Volkova R.M.* Platinum, its alloys and composite materials. – https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/platina-ee-splavy-i-kompozitsionnye-materialy (date of request: 08.07.2025).

11. *Vasileva E.V., Zakharova M.I., Lazareva I.Yu.* In: Noble metals and their substitutes. Iss. 28. Sverdlovsk: Institute of metal physics, Ural scientific center, USSR Academy of sciences, 1971.

12. *Murzagareev T.G.* Structure and properties of platinum and rhodium alloys. – https://fizmathim.com/read/572087 /a?#?page=1 (date of request: 08.07.2025).

13. *Loginov Yu.N., Fomin A.A.* Effect of the dispersion strengthening mechanism in a platinum-rhodium alloy on strengthening characteristics. – URL: chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https: //elar.urfu.ru/bitstream/10995/33179/1/itvmim_2012_11.pdf (date of request: 10.07.2025).

14. *Vasekin V.V., Morozova L.E., Yastrebov V.A.* Composite materials based on platinum alloys: production and application // XX Chernyaev conference on chemistry, analytics and technology of platinum group metals": collection of materials. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2013. – http://conf.sfu-kras.ru/conf /chernyaev2013/report?mem b_id=7983 (date of request: 10.07.2025).

15. *Kutenyeva S.V., Gladkovskiy S.V., Nedzvetskiy P.D., Cherkasova T.S.* Structure and properties of layered metal-polymer composites under dynamic and cyclic loading conditions // Physical mesomechanics. Materials with multi-level hierarchically organized structure and intelligent manufacturing technologies. Tomsk: TSU Publishing house, 2021. Pp. 212…213.

16. *Rafalski I.V., Rulenkov A.D., Devoino O.G.* Plasma spraying of Al_2O_3- *Al* composite coatings // Foundry Production and Metallurgy. 2023. № 4. P. 88…93.

17. *Zyablitshev K.V., Ignatov M.N., Ogaryshev S.I.* Design of spinneret feeders for melting process. – http://iii04.pfo-perm.ru/Data2003/ziablic/ziablic.htm (date of request: 10.07.2025).

Рекомендована кафедрой технологических машин и мехатронных систем РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 24.09.25.