

СЕЛЕКТИВНО-КОМПОЗИТНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ

Фарходов Феруз Ойбек ўғли

ассистент кафедры «Инновационные, информационные технологии в медицине, Биофизика». Бухарский Государственный Медицинский Институт.

АННОТАЦИЯ

Для того, чтобы определить возможные высокотемпературные селективно-поглощающие покрытия, мы просмотрели в литературе средне- и высокотемпературные поглощающие покрытия. Особый интерес представляют работы, в которых приводятся результаты климатических испытаний селективно поглощающих покрытий. Проведено исследование влияния различных технологических режимов синтеза на солнечной печи на свойства получаемых керметов, а также влияние температуры и времени выдержки расплава.

Ключевые слова. Селективно-поглощающие покрытия, керметы, солнечный спектр, переходные тугоплавкие металлы, поглощение, излучательная способность, высокая температурная стабильность, оптические свойства, микроструктура, морфология, состав, адгезия, критерий тестирования срока службы и термической стабильности коллекторов, термоциклирование, степень деградации, теплотехнические характеристики и др.

ABSTRACT

In order to determine possible high-temperature selective absorbing coatings, we have looked at medium- and high-temperature absorbing coatings in the literature. Of particular interest are the works in which the results of climatic tests of selectively absorbing coatings are presented. The influence of various technological modes of synthesis in a solar furnace on the properties of the resulting kermets, as well as the influence of temperature and melt holding time, has been studied.

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных селективным поглощающим покрытиям. Среди них следует выделить наиболее часто цитируемые и, по нашему мнению, полные обзоры [1-4]. Анализ литературных данных показал, что существует большое количество материалов и технологий, которые дают возможность получить селективные покрытия [1-5]. Из литературы пока не ясно, какая технология является оптимальной и наиболее удовлетворяет требованиям селективно-поглощающего покрытия для

солнечного спектра. Из этого следует, что необходимо проводить более глубокие исследования по селективно-поглощающим покрытиям.

Основные требования к селективно-поглощающим покрытиям состоят в следующем:

- покрытие должно максимально поглощать солнечное излучение, $\alpha_s \geq 0,95$;
- покрытие должно максимально отражать инфракрасную часть области спектра, $R \geq 0,95$;
- покрытие должно иметь очень низкие значения теплового излучения $\varepsilon \leq 0,05$;
- покрытие должно иметь высокие значения термостойкости в вакууме и на воздухе при $T \geq 400^{\circ}\text{C}$.

Для того, чтобы определить возможные высокотемпературные селективно-поглощающие покрытия, мы просмотрели в литературе средне- и высокотемпературные поглощающие покрытия [1]. Некоторые материалы имеют соответствующие оптические свойства и должны быть прочными при рабочих температурах выше 500°C . Различные переходные металлы, особенно те, которые образуются из тугоплавких металлов групп IVA, VA и VIA и их бинарные и тройные соединения, были предложены для применения при высоких температурах из-за их высокой температуры плавления и химической инертности [6]. Бориды, карбиды, оксиды, нитриды и силициды титана, циркония, гафния имеют одни из самых высоких точек плавления в природе, HfC имеет самую высокую температуру плавления 3316°C . Эти материалы также имеют высокую степень спектральной селективности, высокую твердость и улучшенный износ, стойкость к коррозии и окислению [7,8].

Материалы для селективно-поглощающих покрытий должны иметь низкий коэффициент диффузии при высокой температуре и быть устойчивыми по отношению к химическим взаимодействиям с продуктами окисления, включая любые вторичные фазы. Лучший диффузионный барьер представляют нанокристаллические или аморфные материалы. Тем не менее, должен быть компромисс в микроструктуре между покрытием, стойким к окислению, и покрытием с высоким поглощением и низкой излучательной способностью. Высокая температурная стабильность определяется высокой температурой плавления, формированием одного соединения, а также отсутствием фазовых превращений при повышенной температуре. Например, металлы W, Mo, Ir, Os, и Ta, с одной стороны, имеют высокую температуру плавления и могут применяться при высоких температурах, с другой стороны эти металлы имеют очень низкую стойкость к окислению.

Солнечные теплоприемники с покрытиями на основе металлокерамики демонстрируют высокий коэффициент поглощения солнечного спектра и низкий коэффициент теплового излучения. В работах [4,5] выполнены исследования для оптимизации теплоприемников с металлокерамическими покрытиями с целью достижения высокой производительности, исследуя разные металлокерамические материалы (металлокерамические композиты) и конфигурации пленки с помощью различных методов нанесения, таких как электроосаждение, распыление, импульсное лазерное осаждение и др. Эксперименты показали, что использование технологии вакуумно-термического напыления по сравнению с гальваническими технологиями, электроосаждением, осаждением из паровой фазы является стабильной и воспроизводимой. В этих статьях рассмотрены металлокерамические покрытия с высоким коэффициентом поглощения и низким тепловым излучением. В качестве слоев поглощения выбрана металлокерамика на основе Cr_2O_3 , Al_2O_3 , AlN , SiO_2 , и ZrO_2 с включениями металлических частиц Cr , Ni , Co , Mo , Ag , W , Pt , Al , Cu , Au , Zr . Авторы считают, что представленная группа материалов является перспективной для создания селективно-поглощающих покрытий на основе металлокерамики с высокой термической стабильностью и высокой эффективностью преобразования солнечного света в тепло.

В работе [9] авторами были изготовлены градуированные слои $\text{Cr} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ на Cu подложках методом магнетронного распыления путем изменения потока кислорода. В этой системе получено значение интегрального коэффициента поглощения в диапазоне от 0,90 до 0,94 и тепловое излучение 0,04. Дальнейшую оптимизацию структуры металлокерамической пленки проводили Нуньес и др. [10]. Они предложили конфигурацию четырехслойного покрытия, состоящего из трех металлокерамических слоев и одного антиотражающего слоя поверх них, в которых содержание Cr уменьшается в направлении от подложки к поверхности. При $T = 82^\circ\text{C}$ были получены значения интегрального коэффициента поглощения 0,94 и теплового излучения 0,06. Yin и др. разработали еще одну структуру пленки с конфигурацией LHL (L – низкая объемная доля металла в металлокерамике, H – высокая объемная доля металла в металлокерамике), изготовленную методом магнетронного распыления, изменяя величину тока магнетрона [11]. Поглощающее покрытие, осажденное на оптическое стекло, покрытое хромом толщиной 200 – 400 нм, имело значение интегрального коэффициента поглощения 0,92 – 0,96 и тепловое излучение от 0,05 до 0,08 при $T = 100^\circ\text{C}$. Устойчивость покрытий после отжига при $T = 170^\circ\text{C}$ в течение длительного времени (840 дней) показала, что оно пригодно для солнечных систем горячего водоснабжения. Спектры отражения после отжига при

температуре 200°C , 300°C , 400°C и 500°C в вакууме в течение 1 часа показали, что покрытия термически стабильны до $300 - 400^{\circ}\text{C}$. Что касается подготовки в крупном масштабе, Graf и др. изготовили селективно-поглощающее покрытие на основе оксинитрида хрома на медных листах ($\approx 60 \text{ м}^2$) методом магнетронного распыления [12]. Селективно-поглощающее покрытие показало хорошие оптические свойства с $\alpha > 0,93$ и $\varepsilon < 0,07$ при $T = 100^{\circ}\text{C}$.

В работе [13] авторы для создания селективно-поглощающих покрытий использовали слои NbTiSiN и NbTiSiON вместо NbTiN и NbTiON слоев, чтобы улучшить термостойкость. Исследована термическая стабильность отдельных слоев и многослойных покрытий, легированных кремнием. Дифракция рентгеновских лучей показала, что включение Si в слой NbTiN (NbTiSiN) не меняет свою преимущественную ориентацию, и Si-легированный NbTiON слой (NbTiSiON) остается в аморфной фазе. Введение Si в NbTiN и NbTiON слои вызывают значительное улучшение стойкости к окислению при 500°C на воздухе. После нагревания на воздухе при 500°C в течение 2 ч коэффициенты селективности селективно-поглощающих покрытий Al/NbTiN/NbTiON/SiO₂ и Al/NbTiSiN/NbTiSiON/SiO₂ при $T = 400^{\circ}\text{C}$ изменяются от 0,934/0,13 до 0,538/0,14 и от 0,931/0,12 до 0,922/0,13 соответственно. Результаты атомно-силовой микроскопии показали, что шероховатость поверхности возрастает соответственно от 18,3 до 41,5 и от 7,9 до 14,7. Селективно-поглощающее покрытие Al/NbTiSiN/NbTiSiON/SiO₂ имеет высокий коэффициент поглощения (0,91) и низкий коэффициент излучения (0,13) после выдерживании при $T = 550^{\circ}\text{C}$ в вакууме в течение 100 ч. Делается вывод, что легирование кремнием играет важную роль в улучшении термической стабильности. В работе [14] селективно-поглощающее покрытие на основе AlSiN/AlSiON наносилось на подложку из нержавеющей стали методом магнетронного распыления. Содержание алюминия и кремния при напылении варьировалось изменением парциального давления газов. Вольфрамовый слой был использован в качестве отражающего покрытия, а тонкие пленки AlSiO_y или SiO_x были использованы в качестве просветляющих верхних слоев. Оптические свойства, микроструктуру, морфологию, состав и адгезию исследовали с помощью оптической спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской спектроскопии, рентгеновской дифракции и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Образцы подвергали отжигу на воздухе при 400°C и в вакууме при 580°C с целью определения степени их стойкости к окислению и термической стабильности в зависимости от соотношения Al : Si. Оптимальные результаты были достигнуты для соотношения за Al : Si = 2,3 : 1. Коэффициент поглощения и тепловое излучение оптимизированных многослойных

селективно-поглощающих покрытий составляет при 400°C 0,93 – 0,94 и 0,07 – 0,1. В [15] многослойное селективно-поглощающее покрытие TiAlN , TiAlON и Si_3N_4 наносили методом магнетронного распыления на нержавеющей сталь. В качестве отражающего покрытия служила тонкая пленка молибдена толщиной 100 нм. Оптические постоянные слоев, нанесенных на кремниевые подложки, определялись с помощью спектральной эллипсометрии и по спектрам отражения каждого материала. Используя оптические постоянные слоев, методом матрицы переноса по измеренным спектрам отражения оптимизировалась структура селективно-поглощающих покрытий. Экспериментально установлено, что слои нанесенных селективно-поглощающих покрытий имели общую толщину 255 нм: TiAlN – 92 нм, TiAlON – 78 нм, Si_3N_4 – 85 нм.

В [16] изучались оптические и структурные свойства металлокерамического селективного поглотителя на основе $\text{AlSiO}_x : \text{W}$ с различным объемным содержанием вольфрама. Было выполнено компьютерное моделирование спектральных характеристик четырехслойного композитного покрытия $\text{W}/\text{AlSiO}_x:\text{W}(\text{H})/\text{AlSiO}_x:\text{W}(\text{L})/\text{AlSiO}_x$ в зависимости от толщины пленок и объемного содержания W , а затем это покрытие было нанесено на подложки из нержавеющей стали методом магнетронного напыления. Химический анализ был выполнен с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Результаты анализа показали, что в металлокерамическом слое $\text{AlSiO}_x:\text{W}(\text{H})$ с высоким содержанием вольфрама около 30 % атомов W находится в нейтральном состоянии W^0 , треть атомов в W^{x+} окисления и последняя треть в состояниях окисления W^{4+} , W^{5+} и W^{6+} . Широкий пик рентгеновских дифрактограмм слоев $\text{AlSiO}_x:\text{W}$ указывает на то, что и W , и AlSiO_x являются аморфными. Результаты оптических измерений указывают на то, что селективно поглощающее покрытие $\text{W}/\text{AlSiO}_x:\text{W}(\text{H})/\text{AlSiO}_x:\text{W}(\text{L})/\text{AlSiO}_x$ является спектрально селективным: $\alpha \sim 94 - 95,5 \%$, $\varepsilon \sim 8 - 9 \%$ при 100°C и $\sim 10 - 14 \%$ при 400°C . Образцы подвергали термическому отжигу при 450°C на воздухе и при 580°C в вакууме. Селективно-поглощающее покрытие термически стабильно и устойчиво к окислению.

Особый интерес представляют работы, в которых приводятся результаты климатических испытаний селективно поглощающих покрытий.

Авторы [17] исследовали влияние коррозии на оптические, тепловые и механические свойства селективно поглощающих покрытий $\text{ZrO}_x/\text{ZrC}-\text{ZrN}/\text{Zr}$ нанесенные на подложки из нержавеющей стали и меди. Были выполнены измерения электрохимических параметров покрытия, исследования поверхности и микроструктуры покрытий как исходных, так и после термоциклирования. Электрохимические измерения проводили в 3,5 мас.% растворе NaCl , которая

соответствует коррозионной среде в условиях потенциодинамической поляризации. Установлена зависимость микроструктурных, механических и тепловых характеристик СПП от величины коррозии. Термически обработанные структуры $ZrO_x/ZrC-ZrN/Zr$ на подложках SS больше подвержены коррозии. Изменение модуля Юнга и твердости подтверждают коррозионную деградацию термически обработанных структур в условиях, как вакуума, так и воздуха. Коррозионная деградация проявляется и в изменении степени черноты: увеличивается с 0,28 до 0,42.

В [18] методом электрофоретического осаждения было изготовлено селективно-поглощающее покрытие, состоящее из слоев на основе углеродных нанотрубок (MWCNT). Оценка долговечности MWCNT проводилась с помощью метода ускоренного старения в соответствии с ISO 22975-3. Результаты измерений показали, что поглотитель MWCNT обладает высокой термической стабильностью, но не устойчив к влажности. Покрытие MWCNT пористое и вода, просачиваясь через поры, окисляет алюминиевую подложку. В качестве защитных слоев на поверхность покрытия были нанесены тонкие пленки SiO_2 , TiO_2 . По сравнению с исходным покрытием оптические свойства изменились. В тесте на термическую стабильность все поглотители MWCNT с защитным слоем проявляли сходные характеристики с образцами без покрытия и имели значение пренебрежимо малой или даже отрицательной производительности РС после 600-часового испытания. В испытании на конденсацию полученные значения РС составляли 0,002, 0,013 и 0,014 для диоксида кремния, 70/30 и 50/50 поглотителей MWCNT с покрытием из оксида кремния и оксида титана, соответственно. Все значения РС были ниже 0,015 после 600 часов испытаний на ускоренное старение, что подтвердило, что поглотители были квалифицированы в соответствии с ISO 22975-3.

Влияние морской атмосферы на деградацию металлических компонентов открытых солнечных тепловых коллекторов изучалось в [19]. Измерения коррозии нелегированной углеродистой стали, цинка, меди и алюминия проводились в соответствии с ISO 9226/1992 и ISO 9223/2012 двумя методами: первый в открытой атмосфере, второй внутри коммерческого плоского теплового коллектора. Одновременно исследовалось влияние микроклиматических условий внутри теплового коллектора на прочность различных поверхностей поглотителя. Результаты показывают чрезвычайно высокие скорости коррозии в открытой атмосфере всех металлов в отличие от образцов металлов внутри теплового коллектора, где высокая коррозионная активность была обнаружена только для аморфных металлов. Результаты оптических измерений экспонированных образцов поглотителя показывают

очень хорошую стабильность материалов. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации испытаний на ускоренное старение поглощающих материалов в отношении агрессивной среды и содержания соли.

На основании обзора [14] и анализа рассмотренных статей, можно сделать вывод, что общим для многих работ является метод определения температурной зависимости излучательной способности. Как правило, в спектральной области $[\lambda_1, \lambda_2]$ измеряется коэффициент отражения $R(\lambda)$, а потом для заданной температуры по формуле (1) рассчитывается $\alpha(T)$:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [1 - R(\lambda)] B(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (1)$$

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1]} \quad (2)$$

где: $B(\lambda, T)$ – спектральное распределение излучения абсолютно черного тела, функция Планка; $c_1 = 2\pi h c^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$; $c_2 = \frac{hc}{k} = 0,01438786 \text{ м} \cdot \text{К}$; c – скорость света; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; σ – постоянная Стефана–Больцмана. Очевидно, что расчет по формуле (1) может приводить к заниженному значению $\alpha(T)$ и соответственно к завышенному значению коэффициента селективности. В этом легко убедиться, если вспомнить, что $\int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi k^4}{h^4 c^2} T^4 = \sigma T^4$, откуда следует неравенство

$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) d\lambda < \sigma T^4$. Следует отметить, что критерий для тестирования срока службы

и термической стабильности коллекторов не применим для высокотемпературных селективно-поглощающих покрытий. Действительно, в этой методике термостабильность определяется нагревом селективного покрытия в вакуумной печи или на воздухе в течение 100 часов, что очень мало по сравнению с желаемым сроком эксплуатации 5 – 30 лет. В общем случае термическая стабильность и долговечность селективно-поглощающих покрытий определяется тепловыми свойствами его компонентов, подложки, режимами температурной обработки, которые изменяются при высоких температурах. Деградация высокотемпературных селективно-поглощающих покрытий

обусловлена увеличением ε . Другими словами, ε является чувствительным индикатором для контроля деградации селективно-поглощающих покрытий. Следует отметить, что ε многих материалов после воздействия высоких температур не возвращается к исходному значению. Важно для каждого селективного покрытия проверить, что излучательная способность не меняется во время цикла нагрева. Очевидно, что по формулам (1), (2) этого сделать невозможно, т.к. при высокой температуре оптические параметры селективно-поглощающих покрытий также будут изменяться, что приведет к другим значения $R(\lambda)$. Поэтому нами было принято решение создать методику измерения $\alpha(T)$ по кривым остывания.

На покрытиях, которые имеют наименьшие значения степени черноты и наиболее высокие значения интегрального коэффициента поглощения, изучены теплофизические свойства после нагрева в вакууме при разных температурах. После нагрева в вакууме до температуры выше 650°C резко возрастает значение степени черноты образцов от 2,8 – 4,6 % до 14,3 – 27,7 % за счет небольшого напыления материала нагревательного элемента на поверхность селективно поглощающего покрытия. При температурах нагрева образцов $\approx 400^{\circ}\text{C}$ поверхность покрытий остается без изменений, а значения теплового излучения ε для системы $\text{TiO}_2 : \text{NiO} : \text{C}$ возрастают от 2,0 – 4,6 % до 3,7 – 7,8 %. Для системы $\text{TiO}_2 : \text{CuO} : \text{C}$ значение ε возрастает от 4,12 до 5,0 %.

Исследование композиционных покрытий на термическую стойкость на воздухе в интервале температур $250 \div 25^{\circ}\text{C}$ и $500 \div 25^{\circ}\text{C}$ и устойчивость к деградации при воздействии окружающей среды показало, что образцы с композиционными покрытиями не потрескались и не разрушились. Образцы выдержали 30 термоциклов. Композиционное покрытие на основе $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$ выдержало термоциклирование на воздухе в интервале температур $250 \div 25^{\circ}\text{C}$, не изменив при этом свои спектрально-оптические свойства. Остальные образцы не выдержали термоциклирования на воздухе и изменили свои спектрально-оптические свойства. Покрытия деградируют за счет окисления металлической составляющей на воздухе при высокой температуре. Проведено исследование композиционных покрытий на термическую стойкость в вакуумной камере в интервале температур $500 \div 30^{\circ}\text{C}$ при вакууме $4 \cdot 10^{-4} \text{ torr}$. Образцы из нержавеющей стали с композиционными покрытиями на основе $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$ и $\text{TiO}_2 - \text{CuO}$ показали достаточно высокую стабильность. Значения интегрального коэффициента поглощения α и степени черноты ε изменились незначительно. После напыления покрытие $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$ имело значения $\alpha = 96,955\%$, $\varepsilon = 3,48\%$, $\alpha/\varepsilon = 27,861$. После термоциклирования в вакууме $\alpha = 94,595\%$, $\varepsilon = 3,5\%$, $\alpha/\varepsilon =$

27,0. $\text{TiO}_2 - \text{CuO}$ после напыления имело значения $\alpha = 92,414\%$, $\varepsilon = 4,82\%$, $\alpha/\varepsilon = 19,173$. После термоциклирования в вакууме $\alpha = 91,23\%$, $\varepsilon = 5,11\%$, $\alpha/\varepsilon = 17,85$. Исследования по термоциклированию композиционных покрытий показали, что керметные покрытия обладают стабильными свойствами при высоких температурах в вакууме и могут быть использованы в высокотемпературных солнечных теплоприемниках. Для покрытия на основе композиционного материала $\text{TiO}_2 : \text{CuO}$, синтезированного плавлением на воздухе при скорости охлаждения расплава $\sim 10^5 - 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, степень деградации в течение 1 месяца незначительная. При этом степень черноты покрытия изменилась от 4,82% до 5,11%, значение интегрального коэффициента поглощения α покрытия практически не изменилось, после напыления $\alpha = 92,414\%$, через 1 месяц $\alpha = 92,595\%$. Коэффициент селективности α/ε меняется от 19,173 до 18,12. Покрытие на основе композиционного материала $\text{TiO}_2 : \text{NiO} : \text{C} = 48 : 44,8 : 7,2$, синтезированного плавлением на воздухе с перегревом расплава при скорости охлаждения расплава $\sim 10^5 - 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, не деградирует на воздухе и сохраняет свои спектрально-оптические свойства. После напыления покрытие имело значения $\varepsilon = 3,48\%$, $\alpha = 96,955\%$, $\alpha/\varepsilon = 27,861$. Через 3 месяца после напыления $\varepsilon = 3,5\%$, $\alpha = 96,332\%$, $\alpha/\varepsilon = 27,521$. Покрытия, полученные из композиционных материалов, синтезированных с перегревом расплава и охлажденных при скорости $\sim 10^5 - 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, обладают наилучшими свойствами и сохраняют их при воздействии окружающей среды с течением времени.

Исследованы фазовый состав композиционных покрытий $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$ и $\text{TiO}_2 - \text{CuO}$ методом рентгеновской дифрактометрии и микроструктура сканирующим электронным микроскопом. При исследовании мы наблюдали изменение фазового состава покрытия за счет того, что напыление в условиях высокого вакуума и температуры приводит к взаимодействию испаряемого материала с подложкой.

Испытания лабораторных макетов элемента вакуумированного теплоприемника с алюминиевой, стеклянной и из нержавеющей стали трубками, на которые нанесены селективно поглощающие покрытия $\text{TiO}_2 - \text{CuO}$ и $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$ показали, что лучшие теплотехнические характеристики получены на макете элемента вакуумированного теплоприемника, в котором при изготовлении была использована трубка из нержавеющей стали с нанесенным подслоем алюминия и селективно поглощающим покрытием $\text{TiO}_2 - \text{NiO}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: (REFERENCES)

1. С.О. Саидов, Ж. Камалов и др. Анализ влияния толщины прозрачного проводящего покрытия и температуры отжига на оптические и

- электрофизические свойства покрытия на примере Zn(Al)O (AZO). // Results of National Scientific Research Journal. May 2022. In Vol. 1. (24.05.2022).
2. S. Esposito, A. Antonaia, M.L. Addonizio, S. Aprea . Fabrication and optimisation of highly efficient cermet-based spectrally selective coatings for high operating temperature // *Thin Solid Films*. 2009. V. 517. P. 6000 – 6006.
 3. C.E. Kennedy. "Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials". // *NREL/TP – 520–31267*. 2002. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
 4. Сулейманов С.Х., Дыскин В.Г., Джанклич М.У., Дудко О.А., Кулагина Н.А., Бугаков А.Г., Кулагин А.А. “Селективно поглощающие покрытия на основе оксидных и керметных композиций для солнечных теплоприемников” // Доклад на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент. 5 – 6 ноября 2015 г. С. 448 – 451.
 5. Cheryl E. Kennedy. "Progress to develop an advanced solar-selective coating". // *14th Biennial CSP SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) Symposium*. March 4 – 7, 2008. Las Vegas, Nevada.
 6. ritschky, F. Cerqueira, C.J. Tavares, P. Santilli, K. Pischow. "Solar selective absorbing coatings based on Cuomo, J.J., Ziegler J.F., and Woodal J.M. "A new concept for solar energy thermal conversion". // *Appl. Phys. Letters*. 1975, Vols. 26 (10). P. 557 – 559.
 7. Blickensderfer, R., Deardorff, D.K., and Lincoln R.L. "Spectral reflectance of TiNx and ZrNx films as selective solar absorbers". // *Solar Energy*. 1977 г., Т. 19. P. 429 – 432.
 8. Schüler, A., Thommen, V., Reimann, P., Oelhafen P., Francz T., Zehnder M., Duggelin D., Mathys R., and Guggenheim G. "Structural and optical properties of titanium aluminum nitride films (Ti_{1-x}Al_xN)". // *J. Vac. Sci. Technol*. 2001 г., Т. 19 (3). P. 922 – 929.
 9. V. Teixeira, E. Sousa, M. F. Costa, C. Nunes, L. Rosa, M. J. Carvalho, M. Collares-Pereira, E. Roman and J. Gago. "Spectrally selective composite coatings of Cr–Cr₂O₃ and Mo–Al₂O₃ for solar energy applications". // *Thin Solid Films*. 2001 г., Т. 392. P. 320 – 326.
 10. C. Nunes, V. Teixeira, M. L. Prates, N. P. Barradas and A. D. Sequeira. "Graded selective coatings based on chromium and titanium oxynitride". // *Thin Solid Films*. 2003 г., Т. 442. P. 173 – 178.
 11. Y. Yin, Y. Pan, L. X. Hang, D. R. McKenzie and M. M. M. Bilek. "Direct current reactive sputtering Cr–Cr₂O₃ cermet solar selective surfaces for solar hot water applications". // *Thin Solid Films*. 2009 г., Т. 517. P. 1601 – 1606.

12. W. Graf, F. Brucker, M. Köhl, T. Tröschler, V. Wittwer and L. Herlitze, J. "Development of large area sputtered solar absorber coatings". // *Non-Cryst. Solids*. 1997 г., Т. 218. P. 380 – 387.
13. Y. Wu, C. Wang, Y. Sun, Y. Ning et al. "Study on the thermal stability of Al/NbTiSiN/NbTiSiON/SiO₂ solar selective absorbing coating" . // *Solar Energy*. September, 2015 г., Т. 119. P. 18 – 28.
14. L. Rebouta, A. Sousa, M. AndAlSiN/AlSiON/AlSiO_y layers". // *Applied Surface Science*. 30 November. 2015 г., Т. 356. P. 203 – 212.
15. L. An, S. Talat Ali, T. Sandergaard et al. "Optimization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ solar absorber coatings". // *Solar Energy*. August. 2015 г., Т. 118. P. 410 – 418.
16. D. Dias, L. Rebouta, P. Costa, A. Al-Rjoub, M. Benelmeki, C.J. Tavares, N.P. Barradas, E. Alves, P. Santilli, K. Pischow. "Optical and structural analysis of solar selective absorbing coatings based on AlSiO_x:W cermets" // *Solar Energy*. Volume 150. 1 July 2017, P. 335 - 344.
17. Kangkai Wang, Shahid Khan, Guangzhong Yuan, Chenzheng Hua, Zhizheng Wu, Chenlu Song, Gaorong Han, Yong Liu. A facile one-step method to fabricate multi-scaled solar selective absorber with nano-composite and controllable micro-porous texture // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 163. April 2017. P. 105 - 112.
18. B. Usmani, A. Dixit . "Impact of corrosion on microstructure and mechanical properties of ZrO_x/ZrC-ZrN/Zr absorber–reflector tandem solar selective structures" // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 157. P 733 - 741.
19. K.Slamova, I. Duerr, T.Kaltenbach, M. Koehl . "Degradation effects of maritime atmosphere on metallic components of solar collectors" // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 147. P. 246 - 254.
20. Амиров Ш. Ё., Нурматов Н. Ж., Камолов Ж. Ж. Определение значения энергии ширины запрещенной зоны тонкой пленки итo (In₂O₃/SnO₂, 90/10%) С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОФОТОМЕТРА // *Results of National Scientific Research International Journal*. – 2022. – Т. 1. – №. 2. – С. 121-125.
21. Саидов С. О. Селективно-поглощающие покрытия на основе металлокерамических материалов Камолов Журабек Жалол угли.
22. Kamolov J., Saidov S. Разработка математической модели нестационарного процесса нагрева и охлаждения тонкой пластинки с керметным покрытием // *Science and innovation*. – 2022. – Т. 1. – №. А6. – С. 626-635.
23. Olimovich S. S., Ugli K. Z. J. To Secure Your Paper As Per UGC Guidelines We Are Providing A Electronic Bar Code.
24. Файзиёв Ш. Ш. и др. Композицион қопламаларнинг акс эттириш спектрларини ўлчаш, селективлик коэффициентини аниқлаш // *Science and Education*. – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 401-404.