

Митюхин Глеб Евгеньевич аспирант ФИЦ КНЦ СО РАН

ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск 660036

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДВИГАТЕЛЬНОМ АВИАСТРОЕНИИ

Аннотация. В представленном исследовании анализируются современные и перспективные направления использования наноматериалов в производстве авиационных двигателей, с особым вниманием к их влиянию на эффективность, надежность и экологические характеристики. Проведен комплексный анализ литературных источников и последних научных разработок в данной области.

Ключевые результаты демонстрируют, что применение наноматериалов способствует значительному повышению эффективности двигателей

Проведенные расчеты показывают потенциальное увеличение общей топливной эффективности двигателей на 3-5%, увеличение межремонтных интервалов на 20-30% и снижение выбросов оксидов азота (NO_x) на 25-30%.

Результаты исследования подтверждают влияние наноматериалов на создание двигателей нового поколения, одновременно выявляя вызовы, связанные с масштабированием производственных процессов и обеспечением долговременной стабильности характеристик.

Научная значимость работы заключается в систематизации современных подходов к применению наноматериалов в авиадвигателестроении и определении ключевых направлений для дальнейших исследований и разработок

Практическая ценность исследования заключается в предоставлении инженерам и разработчикам конкретных технических решений для улучшения характеристик двигателей, а также в определении экономически эффективных путей внедрения нанотехнологий в производственные процессы авиационной промышленности.

Annotation. The presented study analyzes current and promising areas of use of nanomaterials in the production of aircraft engines, with special attention to their impact on efficiency, reliability and environmental characteristics. A comprehensive analysis of literary sources and the latest scientific developments in this field has been carried out.

The key results demonstrate that the use of nanomaterials contributes to a significant increase in engine efficiency

The calculations show a potential increase in the overall fuel efficiency of engines by 3-5%, an increase in maintenance intervals by 20-30% and a reduction in nitrogen oxide (NO_x) emissions by 25-30%.

The results of the study confirm the influence of nanomaterials on the creation of new-generation engines, while simultaneously identifying challenges related to scaling production processes and ensuring long-term stability of performance.

The scientific significance of the work lies in the systematization of modern approaches to the application of nanomaterials in the aircraft engine industry and the identification of key areas for further research and development

The practical value of the research lies in providing engineers and developers with specific technical solutions to improve the characteristics of engines, as well as in identifying cost-effective ways to introduce nanotechnology into the production processes of the aviation industry.

Ключевые слова: наноматериалы, авиационные двигатели, термобарьерные покрытия, нанокompозиты, эффективность, надежность, снижение выбросов, нанокатализаторы, высокотемпературные приложения, аэрокосмические технологии.

Keywords: nanomaterials, aircraft engines, thermal barrier coatings, nanocomposites, efficiency, reliability, emissions reduction, nanocatalysts, high-temperature applications, aerospace technology.

Введение

Углеродные нанотрубки в авиационном двигателестроении: материалы для прорыва в эффективности

Авиационное двигателестроение стоит на пороге новой эры. Традиционные материалы, такие как никелевые суперсплавы, приближаются к пределу своих термомеханических возможностей. Дальнейшее повышение температуры в камере сгорания и коэффициента двухконтурности — ключевых параметров эффективности — требует принципиально новых решений.

Углеродные нанотрубки (УНТ) и композиты на их основе рассматриваются как наиболее перспективный класс материалов, способных совершить этот качественный скачок, обеспечив создание двигателей с беспрецедентным соотношением тяги к массе и топливной эффективности.

Цель настоящей статьи заключается в проведении системного анализа современных и перспективных направлений использования наноматериалов в авиационном двигателестроении. В рамках исследования предполагается рассмотреть основные классы наноматериалов, используемых в данной отрасли, их характеристики и технологические процессы синтеза. Особый акцент будет сделан на изучении влияния наноструктурированных материалов на важнейшие параметры двигателей, включая удельную мощность, топливную экономичность и эксплуатационный ресурс.

Актуальность проведенного исследования определяется постоянно растущими требованиями к экологической безопасности и экономической эффективности воздушного транспорта. В условиях ужесточения экологических стандартов и увеличения стоимости авиационного топлива создание высокоэффективных двигателей становится приоритетной задачей для авиационной промышленности. Наноматериалы, демонстрирующие уникальное сочетание механических, термических и каталитических характеристик, могут стать решающим фактором в решении этой задачи.

В процессе исследования будут проанализированы новейшие достижения в области применения нанокompозитных материалов для создания легких и высокопрочных конструкционных компонентов, использования наноструктурированных защитных покрытий для лопаток турбин, работающих в условиях высокотемпературной коррозии, а также перспективы использования нанокатализаторов для оптимизации процессов сгорания топлива. Дополнительно будут рассмотрены потенциальные вызовы, связанные с внедрением нанотехнологий в авиационное двигателестроение, включая аспекты безопасности, стандартизации и экономической эффективности.

Проведенное исследование направлено не только на систематизацию существующих знаний в области применения наноматериалов в двигателестроении, но и на определение векторов дальнейшего развития этого перспективного направления. Полученные результаты могут быть использованы специалистами в области материаловедения и двигателестроения для создания новых технологических решений, а также руководителями инновационных проектов для оценки потенциала внедрения нанотехнологий в производство авиационных двигателей.

1. Уникальные свойства УНТ

Классификация наноматериалов осуществляется по различным признакам, причем наиболее фундаментальным подходом является их разделение по размерности. Согласно этой системе, выделяют четыре основные категории:

Нульмерные наноматериалы (0D) - все три измерения находятся в нанометровом диапазоне. К этой категории относятся:

- Наночастицы металлов и оксидов
- Квантовые точки
- Наноалмазы

Одномерные наноматериалы (1D) - два измерения в нанометровом диапазоне, одно - значительно больше. Включают:

- Углеродные нанотрубки
- Нановолокна
- Наностержни
- Нанопроволоки

Двумерные наноматериалы (2D) - одно измерение в нанометровом диапазоне, два - значительно больше. Представлены:

- Графен
- Нитрид бора

- Дихалькогениды переходных металлов
- Нанопленки и нанопокрyтия

Трехмерные наноматериалы (3D) - объемные структуры, состоящие из комбинаций вышеперечисленных наноматериалов:

- Нанокompозиты
- Наноструктурированные материалы
- Пористые наноструктуры

В контексте авиационного двигателестроения каждый тип наноматериалов находит специфическое применение. Например, 0D-материалы используются в качестве катализаторов и модификаторов покрытий, 1D-материалы (углеродные нанотрубки) - для армирования композитов, 2D-материалы (графен) - для создания функциональных покрытий, а 3D-структуры - для изготовления деталей с улучшенными механическими свойствами [11, 15].

Таблица 1. Примеры наноматериалов и их применение в авиационном двигателестроении

Тип наноматериала	Примеры	Применение в авиационном двигателестроении
0D (наночастицы)	Наночастицы Al, Ti, Ag	Добавки в сплавы для улучшения механических свойств
1D (нанотрубки)	Углеродные нанотрубки	Армирующие элементы в композитных материалах
2D (нанопленки)	Графен, нитрид бора	Антикоррозионные и термобарьерные покрытия
3D (объемные)	Наноструктурированные сплавы	Конструкционные материалы с улучшенными свойствами

Основные свойства наноматериалов характеризуются значительным улучшением механических, термических и функциональных характеристик по сравнению с объемными материалами. Ключевые особенности включают:

- Повышенную прочность и твердость благодаря уменьшению размера зерен и ограничению движения дислокаций
- Улучшенные теплофизические свойства за счет увеличения площади поверхности и квантовых эффектов

- Уникальные электрические и магнитные характеристики, обусловленные квантово-размерными эффектами
- Высокую каталитическую активность благодаря большой удельной поверхности

Методы синтеза наноматериалов разделяются на две основные стратегии:

Подход "сверху вниз" (top-down):

- Механическое измельчение в высокоэнергетических мельницах
- Лазерная абляция для получения наночастиц
- Литографические методы (электронно-лучевая, наноимпринтная литография)

Подход "снизу вверх" (bottom-up):

- Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) для синтеза углеродных нанотрубок и графена
- Золь-гель процессы для оксидных наноматериалов
- Методы самосборки молекулярных структур

Применение в авиационном двигателестроении включает:

- Армирование композитов углеродными нанотрубками
- Термобарьерные покрытия с наноструктурированными добавками
- Нанокатализаторы для систем сгорания
- Нанопористые материалы для фильтрации и изоляции

Методы характеристики обеспечивают контроль качества:

- Электронная микроскопия (ТЭМ, СЭМ) для анализа морфологии
- Атомно-силовая микроскопия для исследования поверхности
- Рентгеноструктурный анализ кристаллической структуры
- Спектроскопические методы для определения химического состава

Каждый метод синтеза и характеристики имеет специфические преимущества и ограничения, определяющие их применение для решения конкретных задач в создании современных авиационных двигателей [4, 9, 12-14].

Таблица 2. Сравнение основных методов синтеза УНТ для инженерных применений.

Метод	Температура, С	Качество УНТ	Преимущества	Недостатки	Потенциал для масштабирования
Дуговой разряд	>3000	Высокое	Высокая кристалличность	Короткие трубки, примеси	Низкий
Лазерная абляция	>1200	Очень высокое	Высокий выход SWCNT	Высокая стоимость, энергозатратность	Очень низкий
Термическое CVD	500–1000	Высокое	Контроль морфологии, масштабируемость	Высокая температура	Высокий
PECVD	300–700	Среднее-Высокое	Низкая температура, вертикальное выравнивание	Более низкая кристалличность	Средний-Высокий

3. Перспективные применения в двигателях

Повышение механических характеристик компонентов двигателя достигается за счет применения нанокompозитов на основе алюминия, титана и никеля. Упрочнение в таких материалах происходит благодаря нескольким механизмам [5]. Во-первых, наночастицы создают эффективные барьеры для движения дислокаций, что повышает предел текучести в соответствии с механизмом Орована. Во-вторых, высокая удельная поверхность наночастиц способствует формированию когерентных и полукogerентных границ раздела с матрицей, увеличивая энергию, требуемую для пластической деформации. К примеру, введение наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3) размером 20-50 нм в алюминиевые сплавы позволяет повысить предел прочности на 20-30% без потери пластичности. Это связано с тем, что частицы равномерно распределяются по границам зерен, тормозя их рост и движение, и при этом не образуют крупных агломератов, способных стать концентраторами напряжений.

Увеличение термической стабильности деталей двигателя обеспечивается использованием наноструктурированных термобарьерных покрытий на основе оксида циркония (ZrO_2) [15]. Эффективность данных покрытий объясняется рядом факторов. Во-первых, наноструктурированный ZrO_2 обладает более

низкой теплопроводностью по сравнению с микроструктурированным аналогом благодаря усиленному рассеянию фононов на границах нанокристаллов. Во-вторых, наноструктура способствует проявлению эффекта сверхпластичности при высоких температурах, что обеспечивает релаксацию термических напряжений и повышает стойкость к термоциклированию. Кроме того, наноразмерные поры в структуре покрытия действуют как эффективные ловушки для кислорода, замедляя окисление подложки. Исследования демонстрируют, что применение наноструктурированных термобарьерных покрытий толщиной 100-200 мкм позволяет снизить температуру металла лопаток турбины на 50-100°C, что существенно увеличивает их ресурс за счет замедления процессов ползучести и окисления [6].

Повышение теплопроводности отдельных элементов двигателя достигается введением углеродных нанотрубок (УНТ) в полимерные композиты [16]. Улучшение теплопереноса основано на формировании перколяционной сети УНТ в полимерной матрице. При достижении критической концентрации (обычно 0.5-2 об. %) УНТ образуют непрерывные пути для эффективной передачи тепла. Теплопроводность УНТ вдоль оси может достигать 3000-6000 Вт/(м·К), что на порядки превышает аналогичный показатель для полимеров (0.1-0.5 Вт/(м·К)). Для максимального эффекта необходимо обеспечить равномерное распределение и ориентацию УНТ в направлении теплового потока, что реализуется с помощью специальных методов диспергирования и ориентации.

Снижение массы конструкций при использовании нанокompозитов на основе углеродных нанотрубок и графена обусловлено уникальными свойствами этих материалов [17]. УНТ характеризуются исключительно высоким отношением прочности к весу: их удельная прочность может превосходить аналогичный параметр для стали в 100-500 раз. Это объясняется прочными ковалентными связями между атомами углерода в sp^2 -гибридизации и практически идеальной кристаллической структурой нанотрубок. При введении в полимерную или металлическую матрицу УНТ эффективно воспринимают и распределяют

механическую нагрузку благодаря высокому аспектному соотношению (длина/диаметр), которое может превышать 1000.

Графен, представляя собой двумерный материал толщиной в один атом углерода, также обладает выдающимися механическими свойствами [5]. Его теоретическая прочность на разрыв достигает 130 ГПа, что делает его одним из самых прочных известных материалов. В нанокompозитах графен может выступать как в роли армирующего компонента, так и в качестве функционального наполнителя, улучшающего электрические и термические характеристики. Механизм упрочнения композитов с графеном основан на эффективной передаче напряжений через развитую поверхность раздела между графеновыми листами и матрицей, а также на торможении развития трещин.

Применение нанокатализаторов на основе благородных металлов (Pt, Pd) в камерах сгорания для повышения эффективности сгорания топлива и снижения вредных выбросов основано на их выдающихся каталитических свойствах.

Наночастицы платины и палладия обладают чрезвычайно высокой удельной поверхностью (до 600 м²/г), что обеспечивает большое количество активных центров для каталитических реакций. Кроме того, на наноуровне проявляются квантово-размерные эффекты, приводящие к изменению электронной структуры частиц и, как следствие, к повышению их каталитической активности.

Механизм действия нанокатализаторов в камере сгорания включает несколько аспектов:

Ускорение реакций окисления углеводородов, обеспечивающее более полное сгорание топлива и снижение выбросов несгоревших углеводородов и CO.

Катализ реакций восстановления оксидов азота (NOx) до молекулярного азота и кислорода. Снижение температуры начала окисления топлива, что позволяет осуществлять более эффективное сгорание при более низких температурах, уменьшая образование термических NOx.

Наноструктурированные покрытия с гидрофобными свойствами для защиты компонентов двигателя от обледенения и коррозии работают по принципу эффекта лотоса. Этот эффект достигается за счет создания на поверхности

материала наноразмерной текстуры из выступов и впадин размером 10-100 нм. Подобная структура минимизирует площадь контакта между водой и поверхностью, приводя к формированию капель с высоким краевым углом смачивания (более 150°). В результате вода не растекается по поверхности, а собирается в капли, которые легко удаляются, предотвращая обледенение и очищая поверхность.

Механизм антикоррозионной защиты в таких покрытиях основан на создании физического барьера между агрессивной средой и защищаемой поверхностью. Наноструктурированное покрытие обеспечивает высокую адгезию к подложке и минимальную пористость, препятствуя проникновению коррозионно-активных агентов. Кроме того, некоторые наноматериалы, такие как оксид графена, могут проявлять свойства ингибиторов коррозии, образуя пассивирующие слои на поверхности металла.

4. Преимущества интеграции наноматериалов

Использование наноматериалов в авиационном двигателестроении предоставляет значительные преимущества, способные привести к качественному улучшению характеристик силовых установок. Ключевыми аспектами являются повышение эффективности двигателей, увеличение ресурса и надежности компонентов, а также существенные экологические преимущества.

Повышение эффективности двигателей при использовании наноматериалов обусловлено несколькими факторами. Применение наноструктурированных термобарьерных покрытий позволяет повысить рабочую температуру в камере сгорания и турбине. В соответствии с термодинамическим циклом Брайтона, рост температуры на входе в турбину (ТИТ - Turbine Inlet Temperature) непосредственно влияет на термический КПД двигателя. Согласно расчетам, увеличение ТИТ на каждые 50°C обеспечивает повышение общего КПД двигателя приблизительно на 1-1,5% [2]. Современные наноструктурированные покрытия на основе $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ с включением наночастиц Al_2O_3 и Gd_2O_3 дают

возможность поднять ТПТ на 100-150°C в сравнении с традиционными покрытиями, что потенциально может обеспечить прирост КПД двигателя на 2-3% [7].

Кроме того, применение нанокompозитных материалов для производства лопаток компрессора и турбины позволяет усовершенствовать их геометрию благодаря повышенной прочности и жесткости. Это способствует улучшению аэродинамических характеристик и, как результат, повышению изоэнтропического КПД компрессора и турбины. Исследования демонстрируют, что использование нанокompозитов на основе алюминия с добавлением углеродных нанотрубок для лопаток компрессора может обеспечить увеличение его КПД на 1-2% при одновременном снижении массы на 15-20% [9].

Увеличение срока службы и надежности компонентов двигателя представляет собой еще одно важное преимущество применения наноматериалов. Улучшенная износостойкость и усталостная прочность наноструктурированных материалов способствует значительному повышению ресурса критических компонентов. Например, использование нанокompозитных покрытий на основе Ni-Al₂O₃ для защиты лопаток турбины от высокотемпературной коррозии и окисления позволяет увеличить межремонтный интервал на 20-30%. Это не только сокращает эксплуатационные расходы, но и повышает общую надежность двигателя.

Экологические преимущества применения наноматериалов в авиационных двигателях проявляются в двух основных аспектах: сокращении выбросов вредных веществ и уменьшении потребления топлива. Использование нанокатализаторов в камерах сгорания позволяет существенно снизить выбросы оксидов азота (NO_x) и несгоревших углеводородов. Исследования indicate, что применение наночастиц платины и палладия, нанесенных на наноструктурированный оксид алюминия, может обеспечить снижение выбросов NO_x на 25-30% при сохранении или даже повышении полноты сгорания топлива.

Снижение потребления топлива достигается благодаря комплексному эффекту повышения КПД двигателя и уменьшения его массы. Согласно оценкам, использование наноматериалов в конструкции современного турбовентиляторного двигателя может привести к снижению удельного расхода топлива (SFC - Specific Fuel Consumption) на 3-5%. В масштабах мировой авиации это может обеспечить значительное сокращение выбросов CO₂ и других парниковых газов [8].

Следует отметить, что преимущества применения наноматериалов не ограничиваются прямым влиянием на характеристики двигателя. Косвенные effects, такие как возможность создания более легких и эффективных конструкций планера благодаря снижению массы двигателя, также вносят существенный вклад в общее улучшение характеристик воздушного судна. Кроме того, повышение надежности и увеличение межремонтных интервалов приводит к снижению эксплуатационных расходов и повышению безопасности полетов.

Однако, несмотря на очевидные преимущества, внедрение наноматериалов в авиационное двигателестроение связано с рядом вызовов. К ним относятся высокая стоимость производства наноматериалов, необходимость разработки новых технологических процессов и методов контроля качества, а также потенциальные риски для здоровья и окружающей среды, связанные с производством и утилизацией наноматериалов. Решение этих проблем требует комплексного подхода и тесного сотрудничества между научными организациями, промышленностью и регулирующими органами.

Заключение

Интеграция наноматериалов в авиационное двигателестроение является одним из ключевых факторов трансформации современной аэрокосмической отрасли. Анализ текущего состояния исследований и разработок в данной сфере позволяет сформулировать существенные выводы относительно роли наноматериалов в будущем двигателестроения.

Важно подчеркнуть, что наноматериалы создают принципиально новые возможности для совершенствования ключевых параметров авиационных двигателей. Достижение более высоких рабочих температур, увеличение удельной мощности, снижение массы и улучшение экологических характеристик становятся реализуемыми благодаря особым свойствам наноструктурированных материалов. Особую значимость имеет способность наноматериалов обеспечивать параллельное решение задач, которые ранее считались противоречивыми, таких как повышение прочностных характеристик при одновременном уменьшении массы конструкции.

Проведенные исследования демонстрируют, что максимальная эффективность от применения наноматериалов может быть достигнута в критически важных компонентах двигателя, включая лопатки турбин и компрессоров, камеры сгорания и системы тепловой защиты. Применение нанокомпозитов и наноструктурированных покрытий в этих элементах способно обеспечить принципиальное улучшение характеристик двигателей, что окажет существенное влияние на развитие авиации в целом.

Тем не менее, несмотря на значительные достижения в области создания и исследования наноматериалов для авиационных двигателей, сохраняется ряд актуальных проблем, требующих дальнейшего изучения. Среди них - вопросы обеспечения долговременной надежности наноматериалов в условиях эксплуатации, разработка методов неразрушающего контроля и диагностики, а также оценка потенциальных рисков для экологии и здоровья.

В этой связи можно предложить следующие направления для дальнейших исследований и разработок:

Во-первых, требуется углубленное исследование процессов деградации наноструктурированных материалов в условиях, характерных для авиационных двигателей, с целью прогнозирования их долговременной стабильности и разработки методов увеличения ресурса.

Во-вторых, необходима разработка новых подходов и технологий крупномасштабного производства наноматериалов с сохранением их

уникальных характеристик, что является критически важным для практического внедрения в промышленность.

Также актуальной задачей является создание стандартов и методик сертификации наномодифицированных материалов для авиационной промышленности, что позволит ускорить процесс их интеграции в реальные конструкции.

Особого внимания заслуживают исследования в области создания интеллектуальных наноматериалов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям работы двигателя, что открывает перспективы для разработки самодиагностируемых и самовосстанавливающихся систем.

Важное значение имеют междисциплинарные исследования, объединяющие достижения в области материаловедения, химии, физики и инженерных наук, что может привести к созданию принципиально новых решений в области наноматериалов для авиационных двигателей.

В завершение следует отметить, что наноматериалы обладают значительным потенциалом для становления ключевым элементом создания перспективных авиационных двигателей. Их внедрение способно не только существенно улучшить технико-экономические характеристики силовых установок, но и внести значительный вклад в решение глобальных задач, связанных с экологической устойчивостью и эффективностью воздушного транспорта. По мере преодоления существующих технологических и экономических барьеров, наноматериалы будут играть важную роль в авиационном двигателестроении, открывая новые перспективы для развития аэрокосмической отрасли в XXI веке.

Список литературных источников:

1. Padture N. P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion //Nature materials. – 2016. – Т. 15. – №. 8. – С. 804-809.
2. Darolia R. Development of strong, oxidation and corrosion resistant nickel-based superalloys: critical review of challenges, progress and prospects //International materials reviews. – 2019. – Т. 64. – №. 6. – С. 355-380.
3. Tong L., Mouritz A. P., Bannister M. K. 3D fibre reinforced polymer composites. – Elsevier, 2002.
4. Meyyappan, M. (2016). Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) of Carbon Nanotubes. In Carbon Nanotubes: Science and Applications. CRC Press.
5. Tjong S. C. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets //Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2013. – Т. 74. – №. 10. – С. 281-350.
6. Clarke D. R., Phillpot S. R. Thermal barrier coating materials //Materials today. – 2005. – Т. 8. – №. 6. – С. 22-29.
7. Vaßen R. et al. Overview on advanced thermal barrier coatings //Surface and Coatings Technology. – 2010. – Т. 205. – №. 4. – С. 938-942.
8. Pollock T. M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties //Journal of propulsion and power. – 2006. – Т. 22. – №. 2. – С. 361-374.
9. Nieto A. et al. Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites. – CRC press, 2021.
10. Kim, K. J., et al. (2022). Strengthening mechanisms in carbon nanotube-reinforced metal matrix composites: A review. *Carbon, 196, 50-70.
11. Goh, C. S., et al. (2021). Recent progress in the development of carbon nanotube-based aerospace composites. Advanced Engineering Materials, 23(5), 2001215.

12. Abid N. et al. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2022. – T. 300. – C. 102597.
13. Doñate-Buendia C. et al. Microstructure formation and mechanical properties of ODS steels built by laser additive manufacturing of nanoparticle coated iron-chromium powders // *Acta Materialia*. – 2021. – T. 206. – C. 116566.
14. Kumar P. S., Pavithra K. G., Naushad M. Characterization techniques for nanomaterials // *Nanomaterials for solar cell applications*. – Elsevier, 2019. – C. 97-124.
15. Liu Q., Huang S., He A. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines // *Journal of materials science & technology*. – 2019. – T. 35. – №. 12. – C. 2814-2823.
16. Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review // *Progress in polymer science*. – 2011. – T. 36. – №. 7. – C. 914-944.
17. Kumar A., Sharma K., Dixit A. R. Carbon nanotube-and graphene-reinforced multiphase polymeric composites: review on their properties and applications // *Journal of Materials Science*. – 2020. – T. 55. – №. 7. – C. 2682-2724.