

**ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ
ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Сообщение 1. Стратегические аспекты состояния проблемы

Создание летательных аппаратов, как сверхзвуковых и гиперзвуковых, так и гражданских самолетов ставит перед материаловедомы принципиально новые задачи. Материалы для авиационной и ракетно-космической техники должны обладать высокой удельной прочностью при низких и высоких температурах, стабильностью свойств в широком интервале температур в течение длительного времени, высокой стойкостью к коррозии, эрозии, износу, воздействию агрессивных сред, проникающих излучений и климатических факторов, жаропрочностью, газонепроницаемостью и другими свойствами, от которых зависит весовая эффективность, надежность и ресурс. Требуемый уровень свойств может быть обеспечен как совершенствованием существующих, так и созданием абсолютно новых, предназначенных для использования в экстремальных условиях, материалов [1 – 3]^{*)}.

В настоящее время появилось принципиально новое понятие материала. Если раньше материал представлял собой вещество данного состава, которым всецело определялись его свойства, то сейчас сформировалось понятие материала как некой триады: состав – конструкция – технология. При этом свойства оказываются производными не столько состава, сколько строения (конструкции) и технологии [4].

Такое заблаговременное проектирование структуры и ее материализация путем выбора оптимальных параметров последовательных технологических процессов составляет суть современной концепции структурной инженерии материалов. В этой связи именно технология порошковой металлургии, в силу своей специфики, обладает огромными возможностями в области конструирования материалов, то есть оптимизации их состава и структуры, технологических режимов, а также прогнозирования достижимого уровня необходимых физико-механических свойств [2].

Роль порошковой металлургии в исследованиях космоса, ракетно- и авиастроении весьма значительна, поскольку созданные с помощью ее методов материалы обладают такими уникальными свойствами, которые в принципе не могут быть достигнуты при традиционной технологии металлургического производства [5 – 10].

^{*)} Ниже приводится информация, частично содержащаяся в наших монографиях [1-2].

Генеральным условием самого существования современной авиации является создание силовых установок реактивной тяги – газотурбинных двигателей (ГТД). Создание жаропрочных сплавов убедительно показало стратегическое (фундаментальное) значение материалов для современной техники. В 30-х годах прошлого века проблемы жаропрочности просто не существовало. Рабочая температура известных моторных сталей не превышала 300°C . Первые послевоенные разработки жаропрочных сплавов были ориентированы на диапазон рабочих температур $500\ldots 600^{\circ}\text{C}$. За последующие 30 лет рабочие температуры лопаток достигли 1200°C [3].

К материалам современных силовых установок, предназначенных для длительной эксплуатации в жестких условиях комплексного воздействия высоких температур, напряжений и внешней агрессивной среды, предъявляются исключительно высокие требования по жаропрочности, ползучести, жаростойкости, термостойкости, малоцикловой усталости, прочности, возможно низкой плотности и эрозионной стойкости [2, 3].

Основным материалом при изготовлении деталей современных и перспективных ГТД являются жаропрочные сложнолегированные сплавы на основе никеля. Процесс изготовления деталей из таких сплавов традиционным способом связан с определенными трудностями при ковке и литье из-за склонности к сегрегации легирующих элементов в процессе кристаллизации. При использовании же технологии порошковой металлургии предотвращается образование грубых ликвационных скоплений карбидов, карбонитридов и других стабильных соединений, в результате чего появляется возможность изготовления методом горячего деформирования изделий из сплавов, которые в обычном состоянии имеют низкую технологическую пластичность. При этом отличительной особенностью спеченного материала является мелкозернистость и высокая структурная однородность [5, 6, 10].

Следует отметить, что сложнолегированные жаропрочные сплавы являются практически предельными по содержанию основных легирующих элементов из-за ограниченных возможностей существующих рафинирующих процессов переплава и появления в связи с этим зональной ликвационной неоднородности, высокого уровня фазовых и термических напряжений в материале слитков. Этих недостатков избежать при применении металлургии гранул, сочетающей затвердевание с высокой скоростью охлаждения ($10^3\ldots 10^4^{\circ}\text{C}/\text{с}$) расплава в виде микрослитков-гранул и последующую консолидацию их с достижением плотной, беспористой структуры изделия [11 – 12].

Использование высоких скоростей охлаждения при кристаллизации обеспечивает получение однородной мелкозернистой структуры, высокой дисперсности и равномерности распределения фазовых составляющих сплавов. В свою очередь, отсутствие грубой ликвационной неоднородности позволило при разработке новых материалов значительно

поднять пределы легирования сплавов и более полно использовать основные виды упрочнения данного класса материалов [12 – 13].

Металлургию гранул принято считать составной частью порошковой металлургии. Переход от традиционной к гранульной металлургии позволил минимизировать влияние дефектов литой структуры на механические и технологические свойства сложнолегированных сплавов [11].

Металлургия гранул является прогрессивным методом получения заготовок из новых высокожаростойких сплавов для производства дисков и других деталей ГТД.

Возрастающие требования к свойствам металлических материалов стало труднее удовлетворить, применяя традиционную технологию, основанную на выборе систем легирования и формирования квазиравновесных структур при выплавке и термической обработке. Возможности традиционных методов близки к исчерпанию, дальнейшее совершенствование материалов предполагает создание специфических неравновесных структур. Создание материалов с такой структурой стало возможным также благодаря развитию порошковой металлургии. При этом появление большого числа новых технологий в порошковой металлургии связано с потребностями авиации и космонавтики [14].

Новыми направлениями в создании высокотемпературных материалов являются дисперсионное упрочнение и механическое легирование. Благодаря разработке процесса механического легирования стало возможным производство дисперсно-упрочненных жаропрочных сплавов, в которых сочетается упрочнение выделениями γ - фазы, обеспечивающее свойства, необходимые для применения сплавов при низких и средних температурах, и упрочнение частицами Y_2O_3 , что делает их работоспособными при повышенных температурах [2].

Потребность в высокотемпературных и высокопрочных материалах для реактивных двигателей обусловила появление нового класса материалов – керметов, получаемых методом порошковой металлургии. Керметы представляют собой комбинацию металла и керамических веществ с более высокой точкой плавления и большей химической стойкостью (сопротивлением окислению). Они отличаются высокой жаростойкостью, прочностью и твердостью [9, 15].

Порошковая металлургия позволяет не только решить проблему получения жаропрочных сплавов с высоким содержанием легирующих элементов, но и обладает большими возможностями для снижения стоимости сплавов благодаря формованию заготовок, близких по конфигурации к готовому изделию. При традиционном производстве деталей из жаропрочных сплавов масса исходной заготовки нередко в 15 раз превышает массу готового изделия. Это означает, что в процессе механической обработки образуется большое количество дорогостоящей стружки, требующей дополнительной переработки [1 – 2].

Развитие реактивной авиации и ракетной техники потребовало разработки высокотемпературостойких сплавов на основе тугоплавких металлов. В космическом пространстве под действием вакуума, температуры, излучений и частиц высокой энергии резко увеличивается общее и селективное испарение металлов, особенно по границам зерен, изменяется состав сплавов, развивается эрозия и усиливается коррозия поверхности. Селективное испарение компонентов сплава и усиление испарения металла с границ зерен может привести к преждевременной потере прочности. Испарение легколетучих компонентов и образование тонких пленок на поверхности более устойчивых металлов вызывает появление гальванических пар и, как следствие, усиление коррозии металла. Большое значение в космических условиях приобретает совместимость различных материалов. Вследствие очистки поверхности металла повышается привариваемость металлических частей. Уже из сравнения температур, при которых с поверхности испаряется равное количество различных металлов, следует, что тугоплавкие материалы наиболее стойкие в космосе, а их свойства наиболее соответствуют требованиям ко многим деталям космических аппаратов (двигателей, сопел и носовых частей ракет) [16].

Методы порошковой металлургии позволяют использовать наиболее тугоплавкие металлы (а также тугоплавкие химические соединения) для получения конструкционных и функциональных материалов (жаростойких, электротехнических, тяжелых, псевдосплавов и так далее) при температурах, гораздо более низких, чем температуры их плавления [17].

Основная масса авиационных материалов – это легкие (на основе титана, алюминия, магния, бериллия) и специальные сплавы.

Титановые сплавы обладают уникальной комбинацией высоких прочностных свойств, малой плотности и хорошей коррозионной стойкости. Основным направлением развития титановой науки сегодня является расширение области применения титана за счет разработок новых экономичных технологий, обеспечивающих значительное снижение стоимости как самого металла, так и изделий из него по сравнению с уже существующими подходами. Существенно снизить стоимость титановых изделий позволяют методы порошковой металлургии, в частности, метод смесей порошковых компонентов, при котором к порошку титановой основы легирующие элементы добавляют в виде порошков металлов или лигатур [18].

Революция в порошковой металлургии титана произошла после освоения гранульной металлургии, которая при сохранении экономических показателей классической порошковой металлургии (КИМ $\approx 90\%$) обеспечивает получение изделий, вполне сравнимых по качеству с литыми и деформируемыми деталями [2].

Исходным материалом служат не смеси дисперсных порошков чистых металлов, а легированные микрогранулы, каждая из которых имеет заданный состав и правильную сферическую форму. Компактирование микрогранул осуществляют горячей деформацией в вакуум-плотных металлических или керамических капсулах, в результате чего удается получить 100 % -ную плотность заготовок и высокий однородный уровень механических свойств, не уступающий уровню свойств обычных штамповок из литого материала [19].

Применение микрогранул обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру и минимальную дисперсию механических свойств крупногабаритных деталей (при обычной технологии используют крупные слитки, которым свойственны химическая неоднородность вследствие ликвации и крупнокристаллическая структура, что ведет к большому разбросу и общему снижению механических свойств готовых деталей). Поэтому новая порошковая металлургия перспективна для получения ответственных деталей из титановых сплавов для авиационной техники [19].

Применение высоких скоростей охлаждения при кристаллизации позволило создать новую группу алюминиевых сплавов, которые по характеристикам конструкционной прочности близки к стандартам алюминиевых сплавов, а по ряду показателей (технологичность, свариваемость и другие) превосходят последние. Разработаны гранулируемые алюминиевые сплавы, отличающиеся низким ТКЛР, высокой жаропрочностью и другими свойствами, что обуславливает возможности их широкого применения в авиационной технике.

По сравнению с серийными аналогами гранулируемые магниевые сплавы имеют более высокие прочностные свойства и отличаются большей экономичностью производства полуфабрикатов, что в сочетании с низкой массой делает их весьма привлекательными для использования в самолетостроении.

Бериллий, обладающий уникальными физико-механическими свойствами, является конструкционным материалом для техники XXI века. Хорошие тепловые свойства металла, а также хорошая стойкость к окислению делают бериллий прекрасным поглотителем тепла, пригодным для тормозных устройств многоразовых космических аппаратов и военных самолетов. Бериллий применяют для сопел ракет, лазерной авионики, в телескопе James Webb Space. Он весьма перспективен для гиперзвуковой авиации [8, 20].

К важнейшим материалам, применяемым в летательных аппаратах, относятся материалы триботехнического назначения (фрикционные и антифрикционные). С помощью методов порошковой металлургии разработаны материалы для узлов трения, работающие в самых разнообразных условиях: в присутствии смазки и без нее, в воздушной среде

и вакууме, при высоких скоростях и повышенных температурах, в коррозионных средах и так далее [21].

В качестве примера на рисунке приведены области применения спеченных антифрикционных материалов в конструкциях отечественных самолетов ГП «Антонов».

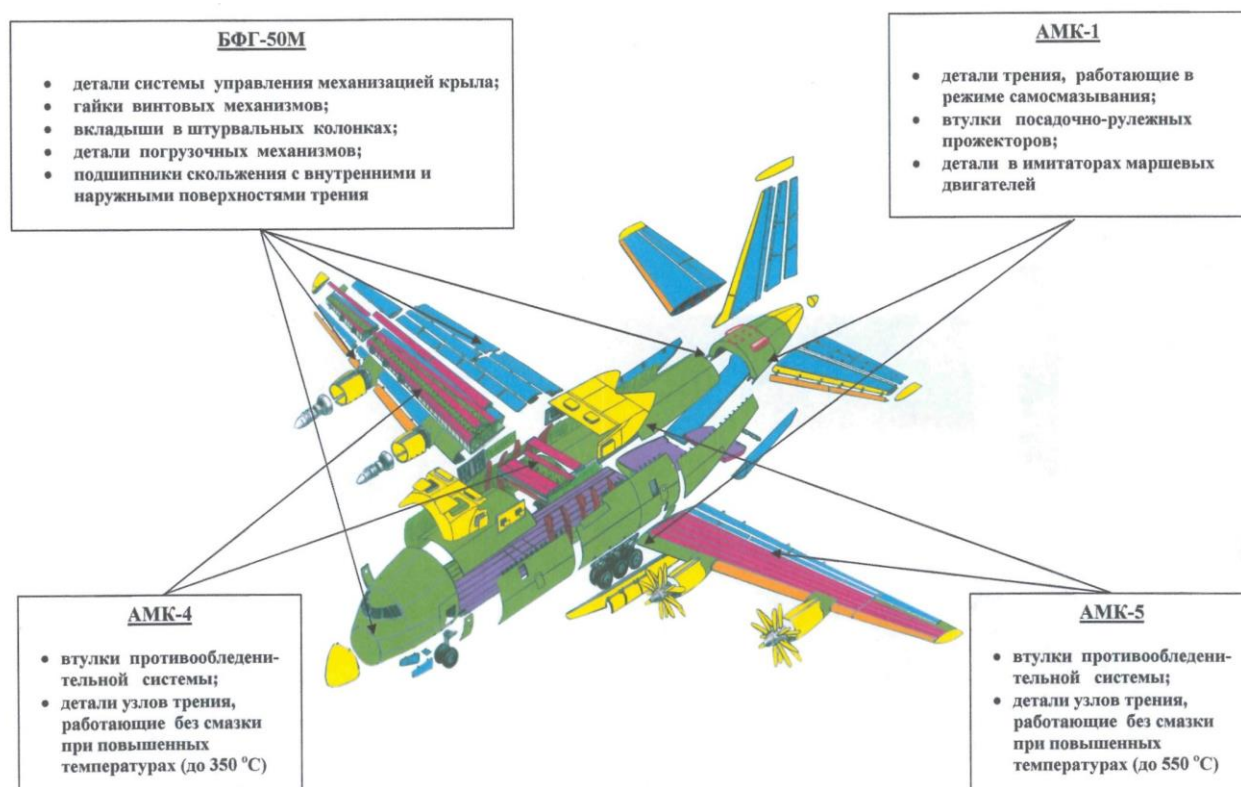


Рисунок 1 – Применение спеченных антифрикционных материалов в конструкции самолетов ГП «Антонов»

Вопросы управления быстродвижущимися объектами с помощью тормозных устройств, передачи энергии от командных к исполнительным органам машины через муфты сцепления, защиты узлов машин от перегрузок за счет использования предохранительных муфт и другие связаны с применением фрикционных материалов [22]. Спеченные фрикционные материалы имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными материалами с органическими связующими. Они работоспособны при значительно более высоких температурах и удельных нагрузках; имеют повышенную износостойкость и стабильность свойств при наличии масла или воды; меньше подвержены воздействию арктического холода, тропической жары и изменениям влажности атмосферы. При этом возможна замена других типов фрикционных материалов на металлокерамику практически без конструктивных изменений фрикционного устройства [23].

Возрастающие потребности авиационной и ракетно-космической техники, где имеются узлы трения с необычными и экстремальными параметрами работы, подтверждают эффективность применения в них также и спеченных антифрикционных материалов [21].

Тактико-технические характеристики современных аэрокосмических объектов различного назначения во многом определяются характеристиками радиотехнических систем, размещенных на борту. Для защиты их от внешних воздействий применяют радиопрозрачные материалы, которые должны иметь высокие радиотехнические характеристики, термостойкость, прочность во всем температурном диапазоне, ударную вязкость и низкие значения теплопроводности, теплоемкости и плотности [24].

Потребность в радиопрозрачных обтекателях антенн летательных аппаратов обусловлена возрастанием их скорости, повышением маневренности, возможностью применения при любых погодных условиях, повышением требований к радиотехническим характеристикам. Основными материалами головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов являются кварцевая и алюмосиликатная керамика, стеклокерамика на основе $Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ и термостойкие стеклокристаллические материалы (ситаллы и ситаллокерамика) с температурой эксплуатации до 1100°C . Применение порошковой технологии позволяет получать целые классы радиопрозрачных стеклокерамических материалов с заданными свойствами за счет изменения технологических параметров [24 – 25].

Для возвращаемых космических аппаратов, входящих в земную атмосферу с огромной скоростью, в результате чего происходит нагрев их поверхности до температур 2000°C и выше, применяют керамические материалы, не подверженные тепловой эрозии (Si_3N_4 , BN , Al_2O_3 и другие). Работа керамических радиопрозрачных материалов при высоких температурах в условиях аэродинамического торможения при гиперзвуковых скоростях обеспечивается за счет абляции материала и снижении температуры его поверхности из-за значительной эндотермичности процессов диссоциации и испарения BN и Si_3N_4 . Для более высоких температур эксплуатации рекомендуются спеченные радиопрозрачные материалы на основе MgO и Y_2O_3 [24 – 26].

Следует отметить, что в ракетно-космической и авиационной технике применяют порошковые материалы, начиная от изделий высокой плотности и до высокопористых структур, используемых в соплах в качестве носовых прокладок, тепловых экранов и поглотителей тепла, в электронных фильтрах, щетках, инерциальных навигационных системах, энергетических системах и так далее [8]. Так, для сравнения, плотность пеноалюминия (конструкционного материала с ячеистой макрострукту-

рой, полученного твердофазным (или порошковым) методом) составляет всего 200...300 кг/м³, в то время как спеченные тяжелые сплавы на основе вольфрама, применяемые в качестве противовесов для элеронов самолета, имеют плотность не менее 16500 кг/м³.

Одним из наиболее перспективных и стремительно развивающихся направлений современного материаловедения является инженерия поверхности (Surface Engineering). Она объединяет методы направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материала путем деформирования, модифицирования, нанесения пленок, покрытий и защитных слоев различными методами. Научно-технические перспективы инженерии поверхности связаны с ее уникальными возможностями по улучшению физических и повышению эксплуатационных характеристик материала в несколько раз при относительно невысоких технологических затратах [2].

Одним из методов управления функциональными свойствами деталей является направленное создание поверхностных слоев методами газотермического напыления порошков. Использование износостойких, коррозионностойких, жаропрочных, теплоизоляционных и других видов газотермических порошковых покрытий позволяет существенно сократить потери металла, расход ресурсов на их возмещение и дает возможность повысить качество, надежность и долговечность машин и механизмов [27].

Частные вопросы газотермического напыления порошков ионно-плазменным методом изложены в наших работах [28 – 34] и защищены патентами Украины [35 – 36].

Защита материалов от высокотемпературного окисления, газовой коррозии и пылевой эрозии является одной из основных проблем авиационного двигателестроения. Наиболее перспективным способом повышения сопротивления коррозионному разъеданию элементов ГТД является применение покрытий, а также более точное определение возможных механизмов коррозионной деградации, которым должен противостоять материал [4, 37].

Все более высокая температура рабочих и направляющих лопаток ГТД обуславливает необходимость улучшения качества покрытий для получения приемлемой долговечности лопастей турбин, работающих в окислительной среде в условиях горячей коррозии. В этой связи особое внимание уделяется разработке оверлейных (внешних) покрытий с максимальной диффузионной стабильностью структуры при контактировании со сплавом подложки и минимальными различиями ТКЛР сплава и покрытия. Оверлейные покрытия наносят методами плазменного напыления металлических порошков [7].

Применение уплотнительных покрытий в ГДТ определяет КПД двигателя и его служебные характеристики, а напыленные износостойкие, жаростойкие и теплоизоляционные покрытия увеличивают срок службы

турбины. Газотермические порошковые покрытия экономически эффективны, поскольку повышение КПД двигателя и продление срока его службы намного перекрывают затраты, связанные с напылением [38].

В процессе эксплуатации детали авиационной техники подвергаются износу, механическим повреждениям поверхности, коррозии и растрескиванию. Некоторые из дефектов ограничиваются поверхностью, и для дальнейшей работы деталей необходимо восстановление их первоначальных размеров. Ремонт таких деталей традиционными методами (гальваническое покрытие, сварка, наплавка) не всегда возможен из-за коробления деталей, возникновения неустраняемых дефектов (пор, трещин, надрывов), структурных изменений в зоне ремонта и так далее. Все эти недостатки отсутствуют при ремонте методами газотермического напыления порошков, при которых нагрев детали не превышает температуру 200°C , а в случае охлаждения сжатым воздухом – 100°C [38].

Важным фактором совершенствования авиационной и ракетно-космической техники на ближайшие годы станут новые материалы на основе нанотехнологий со свойствами и характеристиками, ранее недоступными конструкторам. В этой связи именно методы порошковой металлургии являются наиболее распространенным способом получения наноразмерных частиц, а также объемных материалов в наноструктурированном состоянии [39].

Развитие авиационного транспорта зависит главным образом от развития двигателестроения, прогресса аэродинамики и создания новых конструкционных материалов. Нанотехнология имеет особое значение именно в методах разработки и изготовления совершенно новых конструкционных материалов. Так, для двигателей сверхзвуковых пассажирских самолетов необходимы композиционные керамические материалы с высокой термостойкостью (до температур $1000...1600^{\circ}\text{C}$), которые предполагается разработать с использованием нанотехнологий. Прогнозируется создание наноструктурных углеродных и керамических материалов в десятки раз более прочных, чем сталь [40].

На основе нанотехнологий в ближайшее время станет возможным создание антиобледенительных покрытий, повышение безопасности полетов в 6-8 раз, снижение расходов топлива на десятки процентов, повышение экологичности и комфорта.

Нанотехнологии имеют огромные перспективы в области автоэлектронной эмиссии (для сброса статического электричества с летательного аппарата и управления течением и быстропотекающими процессами детонационного горения в гиперзвуковом потоке) и обеспечения способности поглощать электромагнитное излучение планером летательного аппарата [39].

Развитие космической техники сдерживается высокой стоимостью вывода грузов на орбиту, особенно для полетов на большие расстояния (например, за пределы Солнечной системы). Это стимулирует поиски

новых методов снижения размеров и массы космических аппаратов, а также повышения эффективности систем запуска. Многие из возникающих при этом задач могут быть решены при использовании наноструктурных материалов и устройств. Такие материалы могут быть особенно полезны при изготовлении легких, прочных и термостойких деталей ракет, космических станций и исследовательских зондов для дальних космических полетов. Более того, возможно, в условиях космического пространства (отсутствие гравитации, высокий вакуум) удастся организовать исследования или даже производство таких наноструктур и наносистем, которые затруднительно получить на Земле [41].

В перспективе летательные аппараты будут оснащены множеством нанодатчиков, снимающих в полете информацию об обтекающем воздушном потоке. После ее обработки бортовым компьютером наноактиваторы, воздействуя на поток, будут изменять в нужном направлении условия внешней аэродинамики. Это беспрецедентно повысит эффективность и надежность летательных аппаратов. Особые достижения при использовании нанотехнологий прогнозируются в области их прочности. Будут созданы так называемые «самозалечивающиеся конструкции» из структурированных композиционных материалов с вкрапленными наночастицами, обеспечивающими затягивание возникающих трещин [42].

Сегодня мир стоит на пороге грандиозной наноэпохи в авиационной и ракетно-космической индустрии. Область возможных применений наноматериалов и нанотехнологий в аэрокосмической отрасли поистине безгранична.

Существенному расширению номенклатуры изделий порошковой металлургии в авиационной и ракетно-космической технике способствует освоение аддитивного производства [42]. Аддитивные технологии – это новаторские технологии непосредственного изготовления и ремонта сложнопрофильных и уникальных деталей с высокой точностью из металлических порошков без использования промежуточных операций по обработке заготовок [44].

В авиационной промышленности внедрение аддитивных технологий является весьма перспективным, так как стоимость деталей ГТД, особенно ответственного назначения, весьма высока, а сокращение сроков изготовления, исключение трудоемкого изготовления оснастки (литейной, прессовой), часто также дорогостоящей, представляет огромный интерес при разработке и освоении производства новых изделий [45].

Аддитивные технологии открывают широкие перспективы для повышения весовой эффективности изделий авиационной техники путем более рационального проектирования без учета ограничений (литейные припуски, галтели, простая форма при обработке давлением и так далее) традиционных технологий. Переход к так называемому «бионическому» дизайну (то есть на основе идей, найденных или заимствованных

у природы) позволит перейти к новым принципам проектирования авиационной техники [45].

Кроме того, поскольку многие современные сплавы (например, для лопаток и дисков ГТД) подошли к пику своего развития, то аддитивные технологии могут стать платформой для получения новых прогрессивных материалов и технологий для перспективных двигателей военной и гражданской авиации [44].

Разработка технологий изготовления сложнопрофильных деталей авиационной и ракетно-космической техники с применением аддитивных технологий – это переход к шестому технологическому укладу [44].

Взаимосвязь порошковой металлургии с другими технологическими направлениями существенно расширяет ее возможности, что позволяет решать принципиально новые задачи в области авиационного материаловедения. В этой связи представляет интерес применение методов интенсивной пластической деформации, в частности, винтовой экструзии, к спеченным титановым сплавам в технологической схеме изготовления заготовок для лопаток ГТД. Получаемые при этом заготовки имеют субмикроструктурную структуру и отличаются повышенным уровнем механических свойств и технологической пластичности [46].

Технологии порошковой металлургии постоянно совершенствуются и развиваются. Благодаря возможностям технологических приемов порошковой металлургии, их гибкости и неизменному обновлению, происходит как увеличение потенциальных ресурсов современных материалов, так и расширение номенклатуры порошковых материалов, имеющих зачастую уникальные свойства, отвечающие требованиям новейших разработок в авиа- и ракетостроении [47].

Применительно к производству тугоплавких соединений весьма эффективным является относительно новый метод – самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – своеобразный антипод высокоэнергетических воздействий, поскольку при его использовании не требуется затрат энергии извне. В процессе СВС используется экзотермичность реакций образования карбидов, боридов, нитридов, силицидов. В оптимальных условиях происходит почти полное превращение исходных продуктов в конечный продукт чрезвычайно высокой чистоты (до 99,99%) [5, 46].

Таким образом, успехи в порошковом материаловедении во многом подготовили достижения в авиа- и ракетостроении.

Стратегическим аспектом проведенного выше обзора состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик в первую очередь гражданских самолетов специальными методами являлся анализ применения основных материалов получаемых методами порошковой металлургии и газотермическими порошковыми покрытиями, используемыми в авиационной и ракетно-космической технике, а также с перспективными для самолето- и ракетостроения разработками в области

наноматериалов, металлических, керамических и композиционных спеченных материалов.

Выводы

1. Проведен обзор и анализ стратегических аспектов состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиационных и ракетно-космических летательных аппаратов специальными методами порошковой металлургии и газотермических порошковых покрытий, обеспечивающих в настоящее время и в перспективе существенный резерв совершенствования обсуждаемых объектов, не реализуемый современными традиционными материалами и технологиями.

2. Для полного решения обсуждаемой проблемы представляется необходимым дополнить проведенный обзор и анализ в рамках ее тактических аспектов, устанавливающих совокупность эффективных методов, средств и способов реализации обсуждаемого резерва повышения эксплуатационных характеристик объектов авиакосмической техники.

Список использованных источников

1. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К.: КВИЦ, 2015 – 400 с.

2. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники [Текст] / А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавриненко – К.: КВИЦ, 2016 – 304 с.

3. Бычков, С.А. Состояние и проблемы применения новых конструкционных материалов в отечественных гражданских самолетах в современных условиях. Сообщение 1. Подходы к выбору металлических конструкционных материалов самолетов [Текст] / С.А. Бычков, А.А. Коцюба // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 5 (132). – С. 4 – 16.

4. Шалин, Р.Е. Материалы авиакосмической техники [Текст] / Р.Е. Шалин // Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков. – М.: ВИАМ, 1994. – С. 49 – 63.

5. Технологические процессы получения деталей самолетов методом порошковой металлургии: учеб. пособие [Текст] / В.П. Семенченко, С.Г. Кушнарченко, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – Х.: ХАИ, 1992. – 64 с.

6. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы: пер. с нем. [Текст] / под ред. Шатта. – М.: Металлургия, 1983. – 520 с.

7. Terence M.F. Ronald Advanced materials to high in NASP [Текст] / M.F. Terence Ronald // Advanced Material and Processes, 1989. – N. 5. – P. 29 – 37.

8. Порошковая металлургия и высокотемпературные материалы: пер. с англ. [Текст] / под ред. П. Рамакришнана. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1990. – 352 с.

9. Специальные технологии и материалы порошковой металлургии [Текст] / Д.С. Кива, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко. – К.: КВИЦ, 2014. – 664 с.

10. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов [Текст] / В.С. Факовский, А.Ф. Силаев, В.М. Ходкин, О.Х. Фаттуллин. – М.: Металлургия, 1974. – 184 с.

11. Порошковые и гранульные материалы [Текст] / А.Г. Береснев, И.М. Разумовский, А.В. Лагунов, А.И. Логачева // Технология металлов. – 2009. – № 12. – С. 24 – 37.

12. Ломберг, Б.С. Жаропрочные сплавы и материалы для дисков ГТД [Текст] // Авиационные материалы на рубеже XX – XXI веков / под ред. акад. РИАН Р.Е. Шалина. – М.: ВИАМ, 1994. – С. 258 – 264.

13. Белов, А.Ф. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов [Текст] / А.Ф.Белов, Н.Ф. Апошкин, О.Х. Фатнуллин. – М.: Металлургия, 1984. – 128 с.

14. Бабич, Б.Н. Дисперсионное упрочнение и механическое легирование – новые пути создания высокотемпературных авиационных материалов [Текст] / Б.Н. Бабич // Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков. – Под ред. акад. РИАН Р.Е. Шалина. – М.: ВИАМ, 1994. – С. 304 – 314.

15. Шведков, Е.Л. Словарь-справочник по порошковой металлургии [Текст] / Е.Л. Шведков, Э.Т. Денисенко, И.И Ковенский. – К.: Наук. думка, 1982. – 272 с.

16. Тугоплавкие металлы и сплавы [Текст] / под ред. Г.С. Буханова, Ю.В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.

17. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справ. [Текст] / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомесельский и др; отв. ред. И.М. Федорченко. – К.: Наукова думка, 1985. – 624 с.

18. Производство титановых сплавов и деталей экономическим методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения [Текст] / О.М. Ивасишин, Д.Г. Саввакин, И.А. Бондарева и др. // Наука и инновации, 2005. –Т. 1. – № 2. – С. 44 – 57.

19. Глазунов С.Г. Новая порошковая металлургия титановых сплавов [Текст] / С.Г. Глазунов // Авиационная промышленность, 1982. – № 8. – С. 1 – 12

20. Каськов В.С. Бериллий – конструкционный материал для многогоразовой космической системы [Электронный ресурс] / В.С. Каськов // Электрон. науч. журнал «Труды ВИАМ», 2013. – № 3. – Режим доступа: <http://viam-works.ru>

21. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы [Текст] / И.М. Федорченко, Л.И. Пушка. – К.: Наукова думка, 1980. – 404 с.

22. Федорченко, И.М. Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств [Текст] / И.М. Федорченко, Д.Я. Ровинский, Е.Л. Шведков. – К.: Наукова думка, 1976. – 200 с.

23. Федорченко, И.М. Современные фрикционные материалы [Текст] / И.М. Федорченко, В.М. Крячек, И.И. Пананоти. – К.: Наукова думка, 1975. – 336 с.

24. Технологические аспекты создания радиопрозрачных стеклокристаллических материалов на основе высокотемпературных алюмосиликатных систем (обзор) [Электронный ресурс] / А.С. Чайников, М.И. Ваганова, Н.Е. Щеголева, Ю.Е. Лебедев // Электрон. науч. журнал «Труды ВИАМ», 2015. – № 11. – Режим доступа: dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-11-4-4

25. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники (обзор) [Электронный ресурс] / Ю.Х. Ивахненко, Н.М. Вафрик, В.Г. Максимов // Электрон. науч. журнал «Труды ВИАМ», 2016. – № 5 – Режим доступа: dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5.

26. Гнесин, Г.Г. Радиопрозрачные материалы // Неорганическое материаловедение: энциклопед. изд. в 2-х т. – Т.2. Кн. 2 [Текст] / под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. – К.: Наук. думка, 2008. – С. 204 – 210.

27. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. для ВУЗов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 782 с.

28. Бычков, А.С. Анализ основных закономерностей изменения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий элементов конструкций от технологических параметров их формирования [Текст] / А.С. Бычков // Вісник машинобудування та транспорту, 2016. – № 2(4). – С. 19 – 28.

29. Бычков, А.С. Изменение свойств поверхности деталей на различных этапах формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий. Сообщение 1. Неразрушающий контроль поверхностных слоев материала. Изменение состояния поверхности на технологическом этапе предварительной очистки [Текст] / А.С. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2016. – Вып. 73. – С. 31 – 43.

30. Бычков, А.С. Изменение свойств поверхности деталей на различных этапах формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий. Сообщение 2. Очистка в тлеющем разряде и при ионной бомбардировке поверхности. Свойства оксидов при технологическом нагреве [Текст] / А.С. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуков-

ского «Харьковский авиационный институт». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2016. – Вып. 74. – С. 64 – 77.

31. Бычков, А.С. Структура покрытий, формирующихся при конденсации [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(86). – Х., 2016. – С. 26 – 30.

32. Бычков А.С. Изменение фазового состава при формировании монослойных ионно-плазменных титановых покрытий [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (97). – Х., 2016. – С. 91 – 98.

33. Бычков, А.С. Изменения структуры и свойств поверхности при формировании монослойных ионно-плазменных титановых покрытий [Текст] / А.С. Бычков, А.Г. Моляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (88). – Х., 2016. – С. 90 – 104.

34. Бычков, А.С. Формирование служебных свойств монослойных ионно-плазменных покрытий нитрида титана [Текст] / А.С. Бычков, А.Г. Моляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (89). – Х., 2017. – С. 51 – 67.

35. Пат. 113193 UA Спосіб формування покриття на металевій поверхні за допомогою іонно-вакуумного напилення, МПК(2006) C23C 14/00 / О.М. Івасишин, А.С. Бичков, О.А. Коцюба; заявитель і патентообладатель О.М. Івасишин, А.С. Бичков, О.А. Коцюба - № u 2016 11840; заявл. 23. 11. 2016; опубл. 10.01.2017. – Бюл. № 1. – 3 с.

36. Пат. 117836 UA Спосіб іонно-вакуумного напилення антикорозійного покриття на металеву поверхню, МПК F01P 11/06 (2006.01), F16C 33/12 (2006.01) / О.М. Івасишин, А.С. Бичков, О.А. Коцюба; заявитель і патентообладатель О.М. Івасишин, А.С. Бичков, О.А. Коцюба – u201700791; заявл. 30.01.2017; опубл. 10.07.2017. – Бюл. № 13. – 3 с.

37. Суперсплавы. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок: пер. с англ. [Текст] / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хогелл. В. 2-х кн. / Под ред Р.Е. Шолика. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

38. Борисов, Ю.С. Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. – К.: Техніка, 1986. – 223 с.

39. Егоров, Н.В. Детонационный синтез нанодисперсных алмазов, фуллеренов, углеродных нанотрубок и покрытий на их основе [Текст] / Н.В. Егоров, Л.В. Носачев, А.Б. Яновский // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Тезисы 5-й международ. конф. – Ялта, 2008. – С. 98.

40. Коблов, Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы [Электронный ресурс] / Е.Н. Коблов // Вестник РАН, 2002. – Т. 72. – №1. – Режим доступа: www.viam.ru/public.
41. Нанотехнологии и специальные материалы: учеб. пособие для ВУЗов [Текст] / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, С.А. Должанина, А.П. Петков. – СПб: Химиздат, 2009. – 336 с.
42. Бойкова, М.В. Авиация будущего [Текст] / М.В. Бойкова, С.Д. Гаврилов, Н.А. Гавриличева // Форсайт, 2009. – №1(9). – С. 5 – 15.
43. Чернышев, Л.И. Новые перспективы развития порошковой металлургии [Текст] / Л.И. Чернышев, Д.А. Левина, // Порошковая металлургия, 2014. – №11/12. – С. 148 – 152.
44. Новые технологии порошковой металлургии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vavle-industry.ru>.
45. Исследование свойств сплава ЭП1648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков [Электронный ресурс] / А.Г. Евгенов, А.М. Рогалев, С.В. Неруш, И.С. Мазалов // Электрон. науч. журнал «Труды ВИАМ», 2015. – № 2. – Режим доступа: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2)
46. Павленко, Д.В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов [Текст] / Д.В. Павленко // Процессы механической обработки в машиностроении, 2015. – Вып. 15. – С. 100 – 112.

Поступила в редакцию 31.05.2017.

*Рецензент: канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А.Г. Моляр,
Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова
НАН Украины, г. Киев.*