

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

Сообщение 2. Тактические аспекты состояния проблемы

В предшествующем сообщении [1] были проведены обзор и анализ стратегических (фундаментальных) аспектов состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиационных и ракетно-космических летательных аппаратов специальными методами порошковой металлургии и газотермических порошковых покрытий. Эти аспекты отражают общие, основные вопросы, предопределяющие наиболее важные научные составляющие практической реализации возможностей этого повышения характеристик рассматриваемого класса объектов. При этом отмечалось, что для полного решения обсуждаемой проблемы представляется необходимым дополнить проведенные обзор и анализ в рамках ее тактических аспектов, устанавливающих совокупность эффективных методов, средств и способов реализации обсуждаемого резерва повышения эксплуатационных характеристик объектов авиакосмической техники. Этим вопросам и посвящена настоящая статья. В [2 – 13] с разной степенью полноты обсуждаются методы и технологические процессы получения порошковых материалов на различных этапах развития и становления порошковой металлургии.

Подробный анализ этих и других источников позволил систематизировать существующие методы получения деталей в виде классификационной блок-схемы, не претендующей на исчерпывающую полноту (рис. 1). Как следует из этой классификационной блок-схемы, основными комплексными методами порошковой металлургии являются: формование или прессование, спекание и дополнительная обработка спеченных изделий. При этом, как правило, эти комплексные методы связаны последовательно между собой по цепочке «прессование (формование) → спекание → дополнительная обработка изделий». Обособленными от этой «цепочки» являются методы газотермического порошкового напыления.

Остановимся на кратком анализе этих методов, их составляющих и их классификации. При анализе этих методов будем исходить из основных принципов и правил теории классификаций [14], а именно правил деления объема понятий и образования классов и подклассов родов понятий, составляющих классификационный вид-комплекс методов образования (синтеза) изделий средствами порошковой металлургии.



Рисунок 1 – Классификационная блок-схема основных методов порошковой металлургии, их составляющих и показателей эффективности при реализации для повышения эксплуатационных характеристик конструкции агрегатов самолетов

Обобщая известные определения этих стадий, приведенных в частности в [12 – 13], сформулируем их следующим образом.

Формование порошкового материала – это первая (исходная) стадия методов порошковой металлургии, заключающаяся в получении тем или иным способом компактного изделия определенной формы (формовки).

Спекание порошковой формовки (или смеси порошков) – это вторая (или совмещенная с первой) стадия методов порошковой металлургии, заключающаяся в термической ее обработке при температуре ниже температуры плавления основного компонента, фиксирующая (стабилизирующая) ее форму и эксплуатационные свойства.

Третья (заключительная) стадия – дополнительная обработка спеченной порошковой формовки, улучшающая (закрепляющая) ее форму и эксплуатационные (потребительские) свойства (характеристики) тем или иным способом.

Газотермическое порошковое напыление – это стадия формирования интегрального комбинированного материала путем послойного нанесения тем или иным способом порошка на поверхность исходного (базового) материала в целях улучшения его потребных эксплуатационных характеристик.

Каждую из этих стадий можно рассматривать в соответствии с теорией классификаций [14] как род исходного понятия, состоящий из его видов, подразделяющихся на классы и подклассы. При выборе основ классификаций стадий методов порошковой металлургии приняты правила деления объема понятий [14]. В качестве рода (делимого понятия) первой стадии методов порошковой металлургии – формования - представляется оправданным принять характер приложения воздействий на формируемый материал. Тогда видами этого рода будут статическое, динамическое, вибрационное, ультразвуковое квазирезонансное формование и трехмерная печать.

Виды формования включают в себя следующие классы (рис. 1): 1 – холодное прессование, 2 – горячее прессование, 3 – изостатическое формование, 4 – инжекционное формование, 5 – инфильтрация, 6 – прокатка в валках, 7 – литье.

Приведем краткую характеристику холодного и горячего прессования [13]. Как известно [15 – 17], прессование – формование металлического порошка в пресс-форме под воздействием давления. В результате деформирования начальный объем сыпучего порошкового тела уменьшается и формируется компакт (брикет, прессовка) с заданными формой, размерами и свойствами. Прессование является критической операцией в технологическом процессе, поскольку окончательная форма и механические свойства зависят от уровня и равномерности плотности спрессованного компакта.

При достаточно высокой температуре ($0,5...0,8 T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления) процессы прессования и спекания могут совмещаться, и такой процесс называют горячим прессованием. Горячее прессование – прессование металлического порошка или порошковой формовки при температуре, превышающей $T_{рек}$ ($T_{рек}$ – температура рекристаллизации) основного компонента. Процесс уплотнения при горячем прессовании протекает интенсивнее, чем при обычном прессовании

и спекании, что позволяет получать материалы с низким значением остаточной пористости. Горячее прессование используют для обработки труднопрессуемых порошков и трудноспекаемых порошков тугоплавких соединений. Применение горячего прессования ограничено высокой стоимостью: требуются специальные жаростойкие матрицы, контролируемая атмосфера, при этом производительность процесса очень низкая [15, 17 – 18].

Прессование металлического порошка или порошковой формовки при температуре от $0,1 T_{пл}$ до $T_{рек}$ основного компонента называют теплым прессованием [18].

Изостатическое прессование представляет собой формование шихт или прессовок в оболочках при их всестороннем обжатии. В технологии холодного изостатического прессования порошок помещают в эластичную оболочку, как правило, из полиуретана, которую затем погружают в жидкость (обычно воду) и обжимают при высоком давлении. Таким образом происходит всестороннее уплотнение порошка. Поскольку при этом смазка не требуется, то достигается высокая и однородная плотность изделия. Данный процесс позволяет преодолеть многие ограничения по геометрии деталей (длинномерные тонкостенные цилиндры, детали с подрезами), имеющие место в случае их однонаправленного компактирования в жесткой матрице. Процесс автоматизируется, и в ряде случаев производительность его становится соизмеримой с таковой при прессовании в матрице [15, 18].

Горячее изостатическое прессование (ГИП) – изостатическое формование до получения максимальной плотности заготовки при температуре выше $T_{рек}$. При ГИП вместо жидкой сжимающей среды применяют инертный газ (Ar), а вместо оболочки из органического эластомера используют металлический контейнер. Преимущества ГИП: возможность получения изделий сложной формы (лопаток турбин), регулирования химического состава материала и структуры изготовления деталей из труднопрессуемых и трудноспекаемых порошков; обеспечение равномерной и высокой плотности изделий; сравнительно невысокая стоимость пресс-инструмента. ГИП применяют для прессования материалов, не уплотняющихся в холодном состоянии даже при высоких давлениях, а также когда хотят совместить процессы прессования и спекания или получить материал с особыми свойствами [15, 17 – 18].

Улучшенным вариантом традиционного ГИП является точное горячее изостатическое прессование, обеспечивающее повышенное качество изготавливаемой детали за счет улучшения форм и специальной оснастки для формования детали из порошка благодаря использованию компьютерного моделирования, а также улучшения плотности засыпки порошка в форму за счет использования современных ультразвуковых методов. Данная технология позволяет получать крупноразмерные изделия (включая тонкостенные с толщиной стенок до $0,4...1,0$ мм), име-

ющие структуру с меньшим размером зерен, чем обеспечивается при традиционном литьевом методе. Для детали из титанового сплава, изготовленной методом точного ГИП, $\sigma_e = 1060$ МПа, при литьевом методе $\sigma_e = 900$ МПа [19].

Использование новых технологий, в частности инжекционного формования, позволяет расширить применение порошковых деталей в областях, где необходимы очень мелкие высокопрецизионные детали: приборостроение, точное машиностроение, электронная техника [20].

Технология инжекционного формования начала развиваться в США с середины 70-х годов прошлого века, и уже в начале 90-х годов прошлого века была освоена более 30 фирмами США, Японии и Европы [21]. За последние десятилетия инжекционное формование утвердилось как конкурентоспособный технологический процесс изготовления небольших прецизионных деталей (в том числе тонкостенных и многоступенчатых по высоте) с мелкозернистой структурой без дефектов и анизотропии механических свойств, которые сложно, очень дорого или невозможно изготовить традиционными методами [22 – 23].

С помощью этой технологии можно создавать сложные формы из почти всех материалов, включая металлы, керамику, интерметаллические соединения и композиционные материалы [23]. Метод инжекционного формования позволяет получать заготовки из таких керметов, как карбид титана – сталь, нитрид титана – сталь, карбид вольфрама – кобальт, карбид титана – никель, а также углеродистых, быстрорежущих и нержавеющей сталей, сплавов на основе алюминия, меди, титана [24], железоникелевых и железоникелькобальтовых сплавов [21].

Инжекционное формование является развитием традиционной технологии порошковой металлургии и справедливо считается ее ответвлением [23]. Согласно [21] процесс инжекционного формования заключается в следующем. Металлические порошки крупностью не более 15...20 мкм смешивают при определенных условиях со связующими массами на основе термопластичных или водорастворимых полимеров. Содержание связующего составляет обычно 45...55% по объему. Смесь инжектируется в рабочую полость матрицы под давлением до 200 МПа. При этом заготовка отверждается в результате полимеризации, если применяются термопластичные связующие, или желатинизации, если полимеры водорастворимы. В том и другом случае формовки приобретают жесткость, достаточную для последующих технологических операций. После формования из деталей удаляют связующее путем термической обработки или химической экстракции, затем проводят обычное спекание, в процессе которого усадка деталей из мелкодисперсных порошков достигает 18...23%, а плотность составляет 90...99% теоретической.

Шликерное литье – формование изделий из шликеров (концентрированных суспензий порошков). Основные способы шликерного литья:

- литье в пористые формы – шликер наливают в форму и выдерживают до образования изделия, которое формируется благодаря капиллярным силам всасывания, обуславливающим ток жидкой фазы к стенкам формы;

- литье из термопластичных шликеров (горячее литье) – нагрев термопластичного шликера до температуры его текучести, формование и последующее охлаждение до затвердевания;

- формование электрофоретическим методом – постепенное наращивание слоя из частиц шликера, перемещающихся под воздействием электрического поля к электроду-форме и осаждающихся на ней [23].

Шликерным литьем можно получать изделия сложных форм, миниатюрные и крупногабаритные, полые с равномерной толщиной стенок, с равномерной плотностью по объему, с высокой чистотой поверхности и точных размеров [8].

Прокатка порошков – непрерывное формование заготовок из порошков валками. Основным отличием прокатки порошков от прокатки компактного материала является существенное изменение их свойств – переход из сыпучего состояния в компактное. Способы прокатки отличаются расположением плоскости осей прокатных валков (вертикальная, горизонтальная или наклонная прокатка), состоянием обрабатываемого материала (горячая, теплая и холодная прокатка), подачей порошка (гравитационная, принудительная) и формой проката (лист, профиль) [25].

Возможности прокатки:

- изготовление порошкового проката (в том числе многослойного) с особыми свойствами, которые нельзя обеспечить для проката из литого металла;

- упрощение процесса производства беспористого порошкового проката с обычными свойствами и снижение его стоимости;

- изготовление порошкового проката или сплавов, трудно- или недеформируемых в литом состоянии, а также для материалов и сплавов, которые нельзя получить плавлением [8].

Новыми методами прокатки являются ассиметричная и дискретная прокатка порошков. Ассиметричную прокатку выполняют с рассогласованием окружных скоростей рабочих валков за счет изменения угловой скорости одного из них при одинаковом диаметре валков или с использованием валков разного диаметра, вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями [29]. Дискретную прокатку порошков осуществляют в наклонном направлении в валках, один из которых имеет гладкую поверхность, а на поверхности второго валка выполнены выступающие вставки [26].

Компактирование атмосферным давлением – один из способов квазиизостатического прессования. Технология включает в себя изготовление стеклянной оболочки; активацию поверхности частиц мелкого порошка путем введения борной кислоты или раствора борной кислоты в метаноле, что обеспечивает разрушение оксидного слоя на поверхности металлических частиц; заполнение капсулы порошком и ее вакуумирование с последующим спеканием. В процессе выдержки при температуре спекания оболочка размягчается и подвергается сжатию под действием разности внешнего (атмосферного) и внутреннего давлений. В условиях квазиизостатического прессования формируются низкопористые порошковые изделия ($\Pi_{ocm} \leq 1...2 \%$, где Π_{ocm} – остаточная пористость). Последующая горячая обработка давлением со степенью деформации порядка 30% приводит к дальнейшему снижению остаточной пористости. По этой технологии изготавливают изделия из суперсплавов [27 – 28].

Сегасон-процесс – это процесс квазиизостатической консолидации порошков под высоким давлением, в котором используется гранулированная среда в качестве передающей давление вместо жидкости, применяемой при ГИП. Заготовки уплотняемого материала помещают в гранулированную среду, к которой прикладывают одноосное давление. При этом частицы гранулированной среды с легкостью «обтекают» заготовку и перераспределяют приложенное давление квазиизостатическим способом. С помощью этого процесса при температуре 1200°C под давлением 1,24 ГПа в течение 45 с получен беспористый материал *TiAl* [27, 29].

К динамическим видам формования, по-видимому, следует отнести высокоскоростные виды (рис. 1): 1 – взрывное, 2 – гидродинамическое, 3 – изотермическую штамповку, 4 – магнитно-импульсное, 5 – ударное прессовое, 6 – электроконсолидацию, 7 – вибрационное формование.

Приведем краткую характеристику этих классов динамического вида формования порошковых компактов.

Исследования в области физики ударных волн и импульсного нагружения материалов, которые проводятся с 60-х годов прошлого века в бывшем Советском Союзе, США, Англии, Германии, Японии и других промышленно развитых странах, свидетельствуют о большой перспективности использования импульсных процессов в порошковой металлургии [27].

Импульсное формование возникло как метод получения крупногабаритных прессовок из порошков малопластичных материалов и композиций, брикетов высокой плотности, а также как результат обоснованного стремления отказаться от использования прессов и установок большой мощности [8]. Последнее обусловлено одной из основных проблем порошковой металлургии, связанной с возможностью изготовления

крупногабаритных изделий. Так, например, для формования плиты размером 500×500×100 мм потребовался бы пресс усилием около 20000 т. Ограниченный выпуск тяжелых прессов и их высокая стоимость являются серьезным препятствием для развития ряда направлений порошковой металлургии и в то же время стимулом для внедрения методов импульсного формования [33].

Определяющим признаком импульсного формования является использование скоростей нагружения, превышающих скорость продольных упругих волн, составляющую для порошков в состоянии утряски 50...100 м/с; в этом случае нагружение имеет волновой характер, и уплотнение порошка происходит либо за фронтом ударной волны, либо в пластических волнах сжатия. При высоких скоростях нагружения происходит интенсивное пластическое течение прессуемого материала и связанное с ним деформационное упрочнение и разрушение частиц. Так как при высоких скоростях нагружения сопротивление материала пластическому деформированию обычно возрастает, то кривая давление – плотность при импульсном прессовании лежит, как правило, ниже кривой, полученной в условиях статического нагружения. Высокие скорости нагружения приводят к уменьшению коэффициента бокового давления, а также внешнего и межчастичного трения, что существенно облегчает процесс нарастания плотности прессуемого порошкового тела [27].

Задачи импульсного нагружения могут решаться с использованием взрывчатых веществ (ВВ), сжатых и горючих газов, электрогидравлического разряда, импульсного магнитного поля и других. Однако наиболее перспективным при импульсном нагружении порошков является применение в качестве энергоносителя заряда бризантных (тротила, гексогена и тому подобное) или метательных ВВ (порохов), отличающихся в основном скоростью взрывчатого превращения [27, 35].

Взрывное прессование представляет собой способ формования деталей, при котором уплотнение происходит мгновенно возрастающим давлением взрывной волны [32, 35]. Время действия высоких давлений при взрывном прессовании обычно не превышает $(5...9) \cdot 10^{-6}$ с [27]. При взрывном прессовании свободно насыпанных металлических порошков можно получить прессовки с равномерно распределенной плотностью, достигающей 90% теоретической. В случае прессования взрывом предварительно спеченных брикетов плотность изделий может достигать 99,3...99,9% [35].

Метод взрывного прессования обеспечивает получение брикетов с более высокими прочностными показателями, чем при обычном статическом прессовании при одной и той же плотности брикетов, что объясняется увеличением суммарной площади металлических контактов при взрывном деформировании. Установлено, что ударная вязкость, твердость и электропроводность также существенно выше для брикетов

взрывного прессования, чем для брикетов той же плотности, полученных при статическом нагружении [8].

Применение при высокоскоростном прессовании в качестве энергопередающей среды жидкости позволило создать новый вид прессования – гидродинамическое [25]. Гидродинамическое прессование – это прессование материала в жидкой среде за счет энергии распространяющейся в ней ударной волны. Ударная волна в жидкости может инициироваться, например с помощью взрывчатых веществ, электрического разряда и передаваться жидкостью непосредственно или через промежуточное звено (жесткое или эластичное) [25].

В гидродинамических установках, использующих взрывчатые вещества (ВВ), источником высокого давления является энергия газообразных продуктов сгорания пороха [25]. Использование для прессования энергии сгорания порохового заряда позволяет в значительной степени устранить недостатки, присущие известным методам статического прессования порошков [27].

Комплексные исследования по промышленному использованию метательных взрывчатых веществ (порохов) для прессования жидкостью высокого давления ведутся с середины 60-х годов прошлого века [27]. Первая в мировой практике гидродинамическая машина рамного типа ГДМ6-190/700 была создана во Всесоюзном научно-исследовательском институте металлургического машиностроения совместно с Белорусским Научно-производственным объединением порошковой металлургии.

Технология горячего динамического компактирования нанопорошков включает в себя получение порошков Al_2O_3 и TiO_2 электровзрывом металлических проволок в кислородсодержащей атмосфере, засыпку полученных порошков в пресс-форму; нагрев в вакуумной печи в течение 3,6...5,4 кс для удаления адсорбентов с последующим импульсным одноосным прессованием при температурах 450 и 600 °С. Плотность горячедеформированных порошковых Al_2O_3 и TiO_2 составляет, соответственно, 3960 и 3240 кг/м³ [28].

В основе магнитно-импульсного метода прессования нанопорошков лежит электромеханическое преобразование энергии первичного емкостного накопителя в кинетическую энергию пресс-инструмента, совершающего работу по сжатию порошка (метод разработан в Институте электрофизики УрО РАН). Метод характеризуется мягкими импульсными волнами сжатия в порошках с амплитудой до 2 ГПа (при многократном использовании пресс-инструмента) и длительностью в диапазоне 10...500 мкс. Метод позволяет генерировать и более высокие импульсные давления (~10 ГПа), но при однократном использовании пресс-инструмента [36].

Ультразвуковое квазирезонансное прессование – способ компактирования (без пластификатора) трудноформуемых нанопорошков с обеспечением минимальных перепадов плотности по объему изделий (способ разработан в Нано-Центре ТПУ, г. Томск). При сухом прессовании керамических нанопорошков в квазирезонансных условиях под действием ультразвука происходит колебательное смещение частиц или агломератов нанопорошка. Положительным моментом при применении ультразвука является снижение величины статического давления, необходимого для компактирования изделия, с увеличением амплитуды колебаний технологической оснастки. С уменьшением размера частиц необходимо повышать частоту вибрирования, а для порошков с непластичными частицами следует также применять большие частоты, но с меньшими амплитудами вибрирования [37].

Метод трехмерной печати (3D-Printing – 3DP), разработанный в Массачусетском институте технологий, является одним из вариантов реализации быстрого прототипирования (Rapid Prototyping). Схема 3DP-устройств во многом аналогична схеме устройств, основанных на принципе селективного лазерного спекания. В этом процессе для соединения частиц порошка вместо лазерного луча используется печатающая головка, аналогичная тем, что применяются в офисных струйных принтерах. Через сопла печатающей головки на поверхность порошкового слоя подается связующий раствор. Перемещаемая в горизонтальной плоскости печатающая головка распределяет раствор по поверхности порошкового слоя точно так же, как струйные принтеры и плоттеры распределяют чернила по поверхности бумаги. Связующий раствор пропитывает порошок, прочно склеивая его частицы. После того, как завершается «печать» первого слоя, строительная платформа опускается. Поверх первого слоя распределяется новая порция исходного материала. Этот процесс продолжается до полного завершения построения модели [38].

Пионером коммерческого использования технологии 3DP является компания Z Corporation (Бурлингтон, Массачусетс). Используя технологию 3DP, Z Corporation разработала 3D-принтеры, которые применяются для создания ранних концептуальных моделей и прототипов изделий различного назначения, работают с невероятной быстротой и отличаются очень низкой себестоимостью [39].

Благодаря огромным преимуществам 3D-технологии, в том числе улучшению визуализации, автоматизации процесса моделирования и увеличенной ценовой эффективности повторного использования 3D-данных для различных целевых применений, в большинстве отраслей промышленности уже сегодня создаются 3D-конструкции, готовые для печати на 3D-принтерах.

Спекание является одним из наиболее важных технологических процессов порошковой металлургии, который в решающей степени определяет конечные свойства получаемых материалов и изделий. Спе-

кание представляет собой сложный комплекс большого количества физико-химических явлений, протекающих одновременно или последовательно при нагревании формовок или свободно насыпанного порошка. Некоторые из этих явлений связаны с обычными эффектами влияния повышенных температур на любое поликристаллическое тело, другие же являются специфичными для пористых порошковых тел [8]. Практической целью спекания является достижение определенного уровня требуемых свойств, формирующихся в процессе нагрева исходного порошкового тела [8].

Можно выделить пять специальных методов спекания (рис. 1): активированное спекание, компактирование прямым электронагревом, зонная плавка, жидкофазное и селективное лазерное спекание.

1. Под активированием спекания понимают сознательное применение дополнительных мер, которые за счет усиления структурной активности влияют на основополагающий процесс кинетики спекания. Целью таких мер являются сокращение времени достижений заданной плотности и прочности, устранение неравномерности в объеме спеченного тела, сказывающейся на этих свойствах, улучшение ударной вязкости или снижение температуры спекания, а для многокомпонентных систем также и выравнивание концентрации [5, 40].

При активированном спекании под воздействием дополнительных факторов, повышающих диффузионную активность спекаемого материала, ускорение процесса спекания и интенсификация изменения свойств материала происходят независимо от давления и температуры [40].

Методы активации спекания можно разделить на две группы:

– химические, основанные на использовании химических реакций восстановления-окисления, диссоциации оксидов, галогенидов, гидридов и так далее;

– физические, к которым относятся циклическое изменение температуры спекания, воздействие ультразвука и различных видов облучения, спекание в магнитном поле и тому подобное [41].

Активирование спекания путем изменения состава атмосферы является одним из наиболее простых и эффективных способов упрочнения изделий и замены оксидного контакта на металлический. Активированная атмосфера может благоприятно влиять на процесс спекания также вследствие удаления примесей и рафинирования спекаемого материала [8].

2. Наиболее распространенным и технологически доступным процессом активации диффузии является прямой электронагрев, то есть передача энергии заготовке за счет выделения джоулева тепла при непосредственном пропускании через нее электрического тока [3].

Спекание прямым электронагревом (СПЭН) имеет ряд преимуществ, главными из которых являются предельно высокая скорость вве-

дения тепловой энергии в порошковое тело и вытекающая из этого возможность проведения спекания на воздухе без использования защитной атмосферы или вакуума. Метод СПЭН обладает также максимальным КПД использования электроэнергии, поскольку нагреванию подвергается только само спекаемое порошковое тело [36].

Тем не менее для метода СПЭН характерны и два недостатка:

– сложность обеспечения однородного энерговоыделения в заготовках сложной формы;

– особо жесткие режимы работы пресс-форм, обычно состоящих из диэлектрической матрицы и электропроводных электродов-пуансонов [36].

В отличие от других типов спекания метод СПЭН в основном используется при одновременном механическом нагружении порошкового тела.

3. Зонная плавка (зонная перекристаллизация) – кристаллофизический метод рафинирования материалов, который состоит в перемещении узкой расплавленной зоны вдоль длинного твердого стержня из рафинируемого материала. Зонной плавке можно подвергать почти все технически важные металлы, полупроводники, диэлектрики, неорганические и органические соединения – свыше 120 веществ [42]. Широкую известность зонная плавка получила в 1952 году благодаря работам В. Пфанна (США), который применил ее для получения германия высокой степени чистоты в специальном контейнере (контейнерная зонная плавка) [42].

Для осуществления контейнерной зонной плавки на твердой загрузке, помещенной в контейнер, создается небольшой расплавленный участок, называемый «зоной», который перемещается вдоль загрузки. При этом на одной поверхности раздела твердой и жидкой фаз (фронт кристаллизации) происходит кристаллизация материала, а на другой (фронт плавления) – подпитка зоны исходным материалом. Контейнерная зонная плавка применяется для очистки материала, не взаимодействующего с материалом контейнера [42].

После 1955 года зонная плавка широко применяется в лабораторной и заводской практике для получения чистых материалов с содержанием примесей до $10^{-7} \dots 10^{-9} \%$.

4. Жидкофазное спекание – спекание многокомпонентных систем с образованием жидкой фазы. Различают спекание с жидкой фазой, присутствующей до конца изотермической выдержки при нагреве, и спекание с жидкой фазой, исчезающей вскоре после ее появления, несмотря на продолжающийся нагрев. Жидкая фаза образуется при расплавлении легкоплавкого компонента или легкоплавкой составляющей (эвтектики). Она облегчает развитие сил сцепления между отдельными частицами порошка при условии их смачивания. При плохой смачиваемости жидкая фаза тормозит спекание, препятствуя уплотнению [8, 25].

Жидкофазное спекание используют для активации усадки и получения изделий с малой или даже нулевой пористостью и высокими показателями свойств. Примерами металлокерамических систем, подвергаемых жидкофазному спеканию, являются $Fe - Cu$, $Cu - Sn$, $WC - Co$, $Cu - Pb$ и другие [8, 25].

5. Одной из разновидностей технологии послойного синтеза является селективное лазерное спекание порошков, при котором смесь материалов с различными температурами плавления подвергают тепловой обработке. В результате происходит синтез материала со сложной структурой, где керамические и металлические частицы связаны посредством матрицы на органической основе, что обуславливает возможность быстрого создания прототипов деталей практически из любых материалов. Гибкость технологии достигается благодаря непосредственному компьютерному управлению процессом, причем в отличие от традиционных методов изготовления деталей, где требуется механическая обработка, трехмерные детали изготавливаются непосредственно путем послойного напекания порошка [43].

Применение технологии лазерного селективного послойного спекания наиболее эффективно, прежде всего, в условиях единичного и мелкосерийного производства, где традиционные методы формообразования становятся экономически невыгодными из-за высокой стоимости оснастки. Данная технология может быть использована для изготовления порошковых изделий сложной геометрии, например форм для литья под давлением мастер-моделей, пресс-форм, электродов инструментов и так далее [43 – 44].

Несмотря на то, что эта технология обеспечивает получение хорошей точности размеров деталей и повторяемость производства, ее применение ограничено резким снижением, по сравнению с традиционным литьем, механических и триботехнических свойств деталей. Более того в результате оплавления частиц порошка (обычно используются порошки со средним размером частиц 5 мкм) и действия термокапиллярных сил в материале образуются поры и раковины размером до 100 мкм, что является дефектом, ограничивающим применение деталей [43].

Полученные методом лазерного спекания изделия требуемой формы можно подвергать дополнительной обработке, в частности отжигу и инфльтрации (пропитке жидкими металлами или полимерами) в целях улучшения их качественных показателей [44].

Допрессовывание – дополнительное прессование спеченных прессовок, которое обычно проводят в тех же пресс-формах, которые используются при первом прессовании, или в пресс-формах, близких к ним по размерам. Допрессовывание, как правило, сопровождается последующим спеканием или отжигом. Операцию допрессовывания производят

в целях увеличения плотности прессовок и улучшения других свойств при изготовлении деталей конструкционного назначения [8].

Калибровка – разновидность обработки давлением, позволяющая получать изделие с точными размерами и/или формой за счет пластической деформации его поверхностных слоев. В порошковой металлургии калибровка – это почти всегда отделочная операция, совмещающая калибровку по размеру и форме. Калибровку осуществляют в калибровочных пресс-формах, часто после предварительной пропитки заготовки смазкой при давлении $0,10 \dots 0,25 P_{пр}$, где $P_{пр}$ – давление прессования [18].

Горячая ковка – ковка при повышенных температурах в целях получения плотных изделий из труднодеформируемых металлов и сплавов (тугоплавких металлов, дисперсно-упрочненных сплавов).

Инфильтрация – это проникновение жидкостей в твердые тела через микротрещины и/или поры за счет капиллярных сил. На явлении инфильтрации базируются такие существенные для порошковой металлургии операции, как импрегнирование и пропитка [25].

Пропитка представляет собой операцию заполнения пор неспеченного или спеченного материала расплавом металла, сплава и так далее с точкой плавления более низкой, чем у пропитываемого материала. Если для заполнения пор материала или заготовки в целях придания им специальных свойств используются любые другие, кроме расплавов, жидкие составы (смазки, смолы), то такая операция называется импрегнированием [25].

Примеры некоторых инфильтрованных материалов приведены в табл.1.

В порошковой металлургии под общетехническим термином «инфильтрация», как правило, понимают именно пропитку материала [25]. Применяя метод пропитки, можно достичь теоретической плотности материала. При этом потребности в прессовом оборудовании и другой оснастке сокращаются [30 – 31], прессование заготовок производится при сравнительно низких давлениях, что повышает стойкость пресс-форм, а сами пропитанные детали имеют точные размеры из-за отсутствия усадки [32].

С помощью метода пропитки значительно возрастают возможности получения новых сплавов с лучшими свойствами [30 – 31]. Пропиткой можно получать материалы, сочетающие в себе в определенной степени противоречивые свойства: прочность, твердость и вязкость. Твердость нужна для сопротивления износу, вязкость – амортизатор ударного воздействия. Следует отметить, что в природе таких материалов не существует. Так, например, пропиткой получают порошковый материал, в котором успешно сочетаются высокая твердость и износостойкость карбида титана с вязкостью стали [33].

Термическую обработку применяют в целях улучшения механических свойств, износо- и коррозионной стойкости порошковых материалов. Спеченные детали можно калить так же, как и литые. При закалке спеченных материалов необходимо учитывать их пористость, а также возможные изменения состава (по сравнению с литыми) и структуры [5].

Таблица 1 – Примеры инфильтрованных материалов [5]

Материал каркаса	Пропитывающий материал	Области применения
Вольфрам, молибден или их сплавы с никелем	Медь, серебро	Электрические контакты
Железо, сталь	Медь и сплавы на ее основе	Детали высокопрочных конструкций и конструкционного назначения
Железо, медь, медноникелевые сплавы	Свинец и сплавы на его основе	Антифрикционные материалы
Те же материалы, напеченные на стальную ленту	Высокополимерные материалы	Антифрикционные материалы
Нихром	Фториды	Антифрикционные материалы
Железо, бронза	Масло	Антифрикционные материалы
Графит	Железо	Антифрикционные материалы
Вольфрам	Серебро, медь	Ракетные сопла
Вольфрам	Медь, никель	Маятники часов, контейнеры для изотопов
Никель, железо	Ртуть	Радиолокационная аппаратура
Стекловолокно	Высокополимерные материалы	Сосуды, конструкционные детали

Химико-термическая обработка – термическая обработка в специально подобранной активной среде, обеспечивающая получение заданного изменения химического состава материала, заготовки или ее части. Цементация – диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий углеродом, результатом которого является повышение износоустойчивости, твердости и усталостной прочности. Нитроцементация заключается в совместном диффузионном насыщении поверхности сталей и чугунов азотом и углеродом для повышения износоустойчивости, твердо-

сти усталостной прочности, иногда – коррозионной стойкости материалов [8].

Обработка паром порошковых деталей заключается в выдержке их при температуре около 500 °С в паре высокого давления. При этом происходит образование слоя магнетита (оксида железа) на всех открытых поверхностях и требуемое изменение свойств (увеличение коррозионной стойкости, прочности на сжатие, поверхностной твердости и износостойкости). Для закаленных сталей обработку паром не применяют, поскольку в результате выдержки при высокой температуре происходит разупрочнение [15].

На спеченные детали электрохимическим методом можно наносить различные покрытия (*Cu, Ni, Cd, Zn, Cr*).

Пиннингование – покрытие поверхности металлических изделий пластичными металлами (*Zn, Sn*, бронза, латунь). Процесс не требует применения электролитов, которые могут быть источником коррозии при попадании их в поры изделия. Суть метода заключается в нанесении на поверхность детали пленки защитного металла особой холодной сваркой [20].

Конструкции авиационной и ракетно-космической техники являются наиболее затратными по применяемым материалам и комплектующим, энергоемкости, трудоемкости и времени создания, а следовательно, и самыми дорогостоящими техническими объектами. Стоимость 1 кг полезного груза при авиационных перевозках составляет 1,0 – 1,5 тысяч дол. США, а для ракетно-космической отрасли вывод на орбиту 1 кг массы обходится в 10 – 100 тысяч дол. США.

В связи с этим при создании объектов авиационной и ракетно-космической техники особенно остро стоит проблема снижения собственной массы конструкции путем применения новых высокоэффективных материалов, современных технологических энергосберегающих процессов изготовления и использования компьютерных и информационных технологий оптимального проектирования и создания изделий [45].

В решении этой комплексной проблемы традиционно несколько обособленно стоит проблема защиты объектов от воздействия как факторов самой среды, так и условий их эксплуатации. Такая защита реализуется с помощью разнообразных покрытий и способов их нанесения на поверхности изделия, контактирующие с теми или иными внешними воздействиями или элементами, непосредственно взаимодействующими между собой [45].

Роль покрытий в ответственных изделиях авиационной и ракетно-космической техники весьма существенна, а именно:

- защита деталей от вредных воздействий среды эксплуатации, приводящих к деструктивным процессам, снижающим статическую и усталостную прочность изделия;

- предотвращение износа деталей в узлах трения за счет создания упрочняющего поверхностного слоя;

- повышение герметичности изделия;

- теплозащита в гиперзвуковых летательных аппаратах, являющаяся единственным средством обеспечения сохранности объекта и его жизнедеятельности [45].

Любое покрытие является функциональным, обеспечивающим конструкции восприятие всего комплекса воздействий в процессе ее эксплуатации. Поэтому решать задачи оптимизации конструкции в процессе ее проектирования и/или изготовления по критерию минимума массы или стоимости при тех или иных ограничениях некорректно без учета покрытия как функциональной части (составляющей) несущего материала, так как последний принципиально не существует (не реализуется) в комплексе своих эксплуатационных свойств без свойств покрытия [45].

Помимо функциональности следует отметить еще один важный аспект, связанный с использованием покрытий. В условиях постоянно возрастающих цен на продукцию авиастроения вопросам поддержания и восстановления летной годности авиационной техники придается исключительно важное значение. Ключевое место в решении этой задачи принадлежит ремонту. Своевременный и качественный ремонт позволяет предотвратить возникновение неисправностей и отказов, продлить ресурс, обеспечить возможность безопасной эксплуатации авиационной техники в течение всего назначенного ресурса [46].

Одной из основных причин, обуславливающих необходимость ремонта, является недостаточная износостойкость деталей подвижных и номинально-неподвижных узлов и соединений авиационной техники. Ремонт авиационной техники включает в себя в качестве составной части процессы восстановления рабочих свойств, формы и размеров деталей с использованием напыленных покрытий из порошковых материалов [46 – 47].

Основными методами нанесения покрытий из порошковых материалов являются газопламенное, плазменное и детонационное напыления, относящиеся к газотермическим методам напыления. Одной из существенных особенностей газотермического напыления является возможность управления составом, структурой и, соответственно, свойствами покрытий за счет применения различных порошковых композиций с широким интервалом соотношения компонентов (металлов, сплавов, оксидов, боридов, нитридов, сульфидов, графита, твердых смазок и так далее) [8, 48].

В основе процесса газопламенного напыления лежит пластификация порошка в высокотемпературном источнике тепла (ацетилен-

кислородном пламени) и нанесение его газовыми потоками на предварительно подготовленную поверхность. Преимуществами данного метода являются высокая производительность процесса, локальность обработки, незначительное влияние на подложку, возможность нанесения покрытий на изделия больших размеров, отсутствие сочетаний материалов покрытия и подложки. В зависимости от назначения покрытия и детали, условий их эксплуатации, контактов сопрягаемых поверхностей при восстановлении детали используют газопламенное напыление порошка без последующего оплавления, с одновременным или последующим оплавлением. Технологический процесс газопламенного напыления состоит из трех основных этапов:

- нагрева поверхности детали до температуры 200...250 °С;
- нанесения подслоя;
- нанесение основных слоев, позволяющих получить покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами [49].

На прочность сцепления покрытия с основой влияют способ подготовки, параметры струйной обработки и время выдержки поверхности после обработки; предварительный подогрев, подслоя, эффективная мощность пламени, параметры процесса распыления, материал покрытия и другие [49].

Процесс плазменного напыления заключается в инъекции материала покрытия в виде порошка заранее заданного состава в высокотемпературную плазменную струю, которая создается в плазмотроне. В плазменной струе частицы порошка плавятся и разгоняются по направлению к подложке. Расплавленная металлическая капля «расплющивается» о подложку и растекается по поверхности. На структуру и свойства получаемого покрытия влияют такие параметры процесса, как степень предварительного подогрева, характеристики плазмотрона, расстояние от плазмотрона до рабочего тела и тому подобное [50].

Преимуществами метода плазменного напыления являются:

- высокая производительность процесса;
- большое количество параметров, обеспечивающих гибкое регулирование процесса напыления;
- регулирование в широких пределах качества покрытий, в том числе получение высококачественных покрытий при введении процесса с общей защитой;
- высокий КИМ (0,3...0,8);
- возможность комплексной механизации и автоматизации процесса;
- широкая доступность метода;
- достаточная экономичность [8].

Для плазменного напыления пригоден любой материал, который можно изготовить в виде порошка необходимых фракций, хотя для оптимизации процесса плавления частиц порошка с разной температурой

плавления может потребоваться некоторая модификация конструкции плазмотрона [50].

Главный недостаток процесса плазменного напыления состоит в том, что он является процессом «прямой видимости», то есть способным наносить покрытия лишь на открытые участки подложки, не затененные от источника осаждаемых частиц. При обработке деталей сложной формы (например, рабочие и направляющие лопатки турбин) это ограничение создает проблемы в регулировании толщины покрытия из-за эффекта «затенения» - полного или частичного блокирования потока осаждаемых частиц порошка на одну часть детали другой ее частью, находящейся на линии прямой видимости от источника и заслоняющего от него эту область подложки. Такая проблема в значительной степени решается сложными перемещениями обрабатываемой детали и плазмотрона при нанесении покрытия [50].

При детонационном напылении наносимый порошок транспортируется к обрабатываемой поверхности с помощью ударной волны, возникающей в результате взрыва смеси газов (ацетилена, водорода и других) с кислородом и обеспечивающей скорость перемещения частиц порошка 800...1300 м/с. В результате соударения частиц с поверхности выделяется тепло, способствующее образованию прочного сцепления частиц с подложкой и между собой. Данный метод позволяет получать беспористые покрытия из материалов с температурой плавления выше температуры взрыва. Размеры и форма изделий при данном методе напыления не ограничены и определяются техническими возможностями устройств для их перемещения в процессе нанесения покрытий, а также размерами звукоизолированного бокса [8, 18].

Преимуществами метода детонационного напыления являются высокое качество напыленных покрытий ($P \leq 1$ %, где P – пористость; прочность сцепления – более 10 МПа); возможность напыления покрытий на холодные изделия ($T_{изд} \leq 200$ °С); умеренный нагрев изделий при их напылении ($T_{изд} \leq 250$ °С); достаточно высокая производительность и широкая номенклатура напыляемых материалов; невысокая чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления [8].

В практике напыления используются как однородные порошки различных материалов, так и гетерогенные порошки сложной структуры – композиционные, а также их механические смеси [7].

Заключение

Проведенный выше краткий обзор и анализ тактических аспектов состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмической техники специальными методами порошковой металлургии, а также стратегических (фундаментальных) ее аспектов, которым посвящена предыдущая статья [1], позволяют хотя бы контурно очертить

сферу частного решения этой проблемы в плане разработки общей концепции повышения эксплуатационных характеристик конструкций агрегатов отечественных гражданских самолетов рассмотренными выше средствами и методами.

Основные составляющие этой концепции схематично показаны на рис. 2. Детальный анализ составляющих этой концепции представляется важными актуальными комплексными научными задачами квалификационной работы докторского уровня.



Рисунок 2 – Основные составляющие концепции повышения эксплуатационных характеристик конструкций агрегатов отечественных гражданских самолетов методами порошковой металлургии

Выводы

1. Проведены обзор и анализ тактических аспектов состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмических

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. Разработан информативный вариант классификации методов порошковой металлургии и показателей (критериев) эффективности для повышения эксплуатационных характеристик деталей авиакосмической техники, включающих в себя ресурс, надежность, условия среды эксплуатации, весовую отдачу, стоимость и другие критерии, в совокупности предопределяющие комплекс современных требований к исследованным объектам.

3. На базе проведенных исследований контурно очерчена сфера полного решения проблемы повышения эксплуатационных характеристик применительно к отечественным воздушным судам транспортной категории и синтезированы основные составляющие концепции прогнозирования перманентного роста их критериальных показателей реализацией методов порошковой металлургии и газотермических покрытий.

Список использованных источников

1. Бычков, А.С. Обзор и анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмической техники специальными методами порошковой металлургии. Сообщение 1. Стратегические аспекты состояния проблемы [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (91). – Харьков, 2017. – С. 24 – 39.

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

3. Федорченко, И.М. Современные фрикционные материалы [Текст] / И.М. Федорченко, В.М. Крячек, И.И. Пананоти. – Киев: Наук. думка, 1975. – 336 с.

4. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы [Текст] / И.М. Федорченко, Л.И. Пушка. – Киев: Наук. думка, 1980. – 404 с.

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

6. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник [Текст] / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомесельский и др.; – отв. ред. И.М. Федорченко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 624 с.

7. Борисов, Ю.С. Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. – Київ: Техніка, 1986. – 223 с.
8. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 782 с.
9. Порошковая металлургия и высокотемпературные материалы: пер. с англ. [Текст] / под ред. П. Рамакришнана. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1990. – 352 с.
10. Технологические процессы получения деталей самолетов методом порошковой металлургии: учеб. пособие [Текст] / В.П. Семенченко, С.Г. Кушнарченко, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». 1992. – 64 с.
11. Специальные технологии и материалы порошковой металлургии [Текст] / Д.С. Кива, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко. – Киев: КВИЦ, 2014. – 664 с.
12. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – Киев: КВИЦ, 2015. – 400 с.
13. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники [Текст] / А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко. – Киев: КВИЦ, 2016. – 304 с.
14. Кондаков, Н.И. Логический словарь-справочник. – М.: Наука, 1975. – 720 с.
15. Dowson Gordon. Powder Metallurgy – The Process and Products. [Электронный ресурс] – Режим доступа www.erma.com.
16. Либенсон, Г.А. Основы порошковой металлургии / Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1997. – 208 с.
17. ДСТУ ISO 3252:2014 Металургія порошкова. Словник термінів [Текст] – На заміну ДСТУ 2751-94; чинний з 2015-01-01. – Київ: Держспоживстандарт України, 2015. – 40 с.
18. Черновол, М.И. Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями: учеб. пособие [Текст] / М.И. Черновол. Київ: Вища шк., 1992. – 79 с.
19. Порошковая металлургия на рубеже веков: новые аспекты, понятия и определения [Текст] / Д.С. Кива, С.А. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко. – Киев: КВИЦ, 2016. – 192 с.
20. Крячек, В.М. Тенденции и проблемы развития порошковой металлургии в Северной Америке [Текст] / В.М. Крячек, Д.А. Левина, Л.И. Чернышев // Порошковая металлургия, 2009. – № 5/6. – С. 155 – 160.
21. Получение деталей из инварных сплавов методами инъекционного формования [Текст] / В.А. Вершинин, И.В. Нельзина, С.Л. Епифанова, З.В. Кузнецова // Порошковая металлургия, 1992. – № 1. – С. 98 – 101.

22. Инжекционное прессование деталей сложной формы для работы в экстремальных условиях [Текст] / Е.Г. Фролова, Л.Н. Ткаченко, М.Б. Штерн, О.В. Михайлов // *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий.* – 5-я междунар. конф., 22 – 26 сент. 2008 г., Большая Ялта, Жуковка: тезисы, 2008. – С. 65.

23. Metal Injection Moulding [Электронный ресурс] / Dr. G. Schlieper, Dr G. Dowson, Dr B. Williams, Dr F. Petzold. – Режим доступа: www.empf.com.

24. Федорченко, И.М. Важнейшие тенденции развития порошковой металлургии. 2. Прогресс в области создания новых материалов [Текст] / И.М. Федорченко // *Порошковая металлургия*, 1989. – № 8. – С. 23 – 33.

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

26. Особенности процессов переноса массы при спекании ультрадисперсных порошков [Текст] / В.И. Новиков, Л.И. Трусков, В.Н. Лаповок, Т.П. Гелешвили // *Порошковая металлургия*, 1983. – № 7. – С. 39 – 46.

27. Роман, О.В. Импульсное нагружение порошковых материалов [Текст] / О.В. Роман, В.Г. Горобцов // *Актуальные проблемы порошковой металлургии*; под ред. О.В. Романа, В.С. Аруначалама. – М.: Металлургия, 1990. – С. 78 – 100.

28. Барай, С.Г. Исследование уплотнения никель-цинковых ферритов на ГМД [Текст] / С.Г. Барай, Г.П. Клецко // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. под ред. О.В. Романа*, 1985. – Вып. 9. – Минск: Высшейш. шк. – С. 16 – 18.

29. Сокольский, Ю.М. Опыт использования титановых пористых элементов для фильтрации кобальтосодержащих суспензий [Текст] / Ю.М. Сокольский, В.А. Павлова, М.А. Литвинец // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. под ред. О.В. Романа*, 1985. – Вып. 9. – Минск: Высшейш. Шк. – С. 71 – 72.

30. Петтибоун, Р.Л. Получение металлокерамических материалов железо-медь методом пропитки и свойства пропитанных изделий [Текст] / Р.Л. Петтибоун // *Новое в порошковой металлургии: 19-я американская конф. по порошковой металлургии*, 1970. – Детройт, США: труды; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1970. – С. 35 – 61.

31. Структура и свойства пористой стали ЖГр1Г1, пропитанной бронзой [Текст] / Т.А. Шевченко, Ю.М. Панин, В.А. Давиденков // *Порошковая металлургия*, 1988. – № 2. – С. 11 – 13.

32. Родомышельский, И.Д. Конструкционные порошковые материалы [Текст] / И.Д. Родомышельский, Г.Г. Сердюк, Н.И. Щербань. – Київ: Техніка, 1985. – 152 с.

33. Цукерман, В.А. Порошковые и композиционные материалы [Текст] / В.А. Цукерман. – М.: Наука, 1976. – 128 с.

34. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия [Текст] / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
35. Бауман, Р.К. Взрывное прессование порошковых материалов (литературный обзор) [Текст] / Р.К. Бауман, Б.Р. Лобашев // Порошковая металлургия: сб. трудов ЦНИИЧМ. – Вып. 43. – М.: Металлургия, 1965. – С. 43 – 52.
36. Баланкин, С.А. Компактирование порошков прямым электронагревом – перспективный метод порошковой металлургии [Текст] / С.А. Баланкин, Н.П. Степанов, А.В. Хрипко // Технология, организация производства и оборудование, 1989. – Вып. 16(1224). – М.: ЦНИИ «Электроника». – 40 с.
37. Воздействие ударных волн на тугоплавкие соединения. III Гексаборид лантана [Текст] / А.В. Ананьев, О.Н. Бреусов, А.Н. Дремин и др. // Порошковая металлургия, 1974. – № 8. – С. 74 – 79.
38. Кузнецов, В. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения [Текст] / В. Кузнецов // Машиностроение и смежные отрасли, 2003. – № 4(13). – С. 1 – 7.
39. Технология 3D-печати Z Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dvfu.ru/files/upfiles/bincubator/Projects/3D_Med/Tehnologija_3D_pechati_Z_Corporation-1.pdf
40. Триботехнические характеристики порошковых самосмазывающихся материалов на основе меди при повышенных температурах [Текст] / Л.Ф. Колесниченко, О.И. Фущич, В.К. Юлюгин и др. // Порошковая металлургия, 1986. – № 2. – С. 69 – 74.
41. Лазерное селективное послойное спекание порошков: проблемы и перспективы [Текст] / Н.К. Толочко, С.Е. Мозжаров, Н.В. Соболенко и др. // Порошковая металлургия, 1995. – № 3/4. – С. 32 – 37.
42. Ноймарк, К.Н. Зонная плавка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bse.sci-lib.com/article048378.html>
43. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей [Текст] / М.Д. Кривилев, Е.В. Харанжевский, Г.А. Гордеев, В.Е. Анкудинов // Управление большими системами: сб. трудов. – Вып. 31. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – С. 299 – 322.
44. Андриевская, Р.А. Порошковое материаловедение [Текст] / Р.А. Андриевская. – М.: Металлургия, 1991. – 205 с.
45. Гайдачук, В.Е. Обзор и анализ состояния проблемы назначения покрытий конструкций авиационной и ракетно-космической техники [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.А. Коваленко, Н.М. Московская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (69). – Харьков, 2012. – С. 7 – 25.
46. Організація та трибології авіаремонтного виробництва [Текст] / А.П. Кудрін, О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, Г.М. Зайвенко. – Київ: НАУ, 2015. – 212 с.