

**МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПОЛНОТЫ
КРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В АГРЕГАТАХ АВИАКОНСТРУКЦИЙ**

Сообщение 2. Спеченные порошковые материалы на основе титана

В предыдущей статье [1] изложен предложенный нами метод последовательного расширения полноты критериальной оценки эффективности использования спеченных порошковых материалов в агрегатах самолета на основе алюминия. Ниже этот метод реализуется для тех же объектов из спеченных титановых сплавов.

Как отмечено в нашей монографии [2] и также в [3], титан и его сплавы, имея существенные преимущества по удельной прочности перед другими конструкционными материалами и широкий диапазон рабочих температур от -250 до $+600^{\circ}\text{C}$, а также высокую коррозионную стойкость и низкую плотность, справедливо называют «металлом космической эры». Вместе с тем сдерживающими факторами применения титана являются его высокая стоимость и низкий КИМ при изготовлении деталей традиционным способом. В связи с этим исключительно большое внимание уделяется привлечению именно методов порошковой металлургии для изготовления деталей из сплавов титана. Это направление начало развиваться в 70-х годах прошлого века с целью, прежде всего, экономии металла и удешевления стоимости изделий. Повышение КИМ в этом случае позволяет в 2-3 раза снизить стоимость деталей [4 – 8]¹⁾.

Технология изготовления титановых деталей методом порошковой металлургии развивается в двух основных направлениях: использование легированных порошков титана и применение смесей порошков исходных элементов [5].

Более экономичной является технология, использующая смеси порошков исходных компонентов и лигатур на их основе. В этом случае процесс изготовления изделий с почти окончательными размерами состоит из холодного изостатического прессования и спекания заготовки, последующего горячего изостатического прессования (ГИП), увеличивающего их плотность от 95 до 99%. При этом материал имеет такую же пластичность, как и кованные отливки [5].

Использование порошков элементарного Ti и лигатуры $Al - V$ при получении заготовок из сплава $Ti - 6Al - 4V$ также имеет значительное преимущество по сравнению с использованием порошков заранее полученного сплава $Ti - 6Al - 4V$ из-за более высокой плотности исходной

¹⁾ Изложенные ниже сведения в значительной степени заимствованы из нашей монографии [2].

прессовки и благоприятного влияния процесса образования сплава в ходе спекания. Оба эти фактора также способствуют повышению плотности спеченных заготовок.

Компания Dynamet Technology (США) разработала технологию изготовления титановых сплавов методом смешивания порошков отдельных компонентов. По этой технологии изготавливают кожухи обтекателя ракеты из сплава $Ti-6Al-4V$ с минимальной плотностью 94%, что позволяет снизить массу каждого кожуха на 70% по сравнению с прежде применявшимися кожухами [5].

В конструкции самолетов применяют титановые штамповки, изготовленные с точными допусками. Исходным материалов для штамповок служат заготовки из сплава $Ti-6Al-4V$, полученные изостатическим прессованием элементарных порошков с последующим спеканием в вакууме. Использование для штамповок порошковых заготовок имеет ряд преимуществ: экономически выгодное изготовление заготовок особой формы, изготовление деталей почти точно в размеры (после штамповки механическая обработка не требуется или требуется очень незначительная), улучшение механических свойств вследствие более мелкого и однородного по размерам зерна.

Порошковые титановые материалы применяют для изготовления крепежных гаек, использование которых перспективно в самолетостроении. Они могут заменить гайки из нержавеющей стали и отличаются от последних почти вдвое меньшей плотностью и значительно более высокой коррозионной стойкостью. Как правило, для изготовления подобных изделий применяют порошковый сплав $Ti-6Al-4V$. Получение заготовок по указанной технологии обеспечивает $\Pi=91...95\%$, $\sigma_e=860...900$ МПа, $\delta=6\%$. Испытания спеченных гаек из титанового сплава $Ti-3Al-2Mo$ на выносливость при циклическом нагружении показали, что они не уступают гайкам, изготовленным из катаного прутка из титанового сплава OT4 [8].

В ОАО «Мотор Сич» серийно изготавливают детали из металлокерамического титанового сплава 2M2A ($Ti-2Mo-2Al$) методом вакуумного спекания при температуре $1200\pm 50^\circ\text{C}$ в течение 3...4 ч смеси элементарных порошков титана ПТ5-1, алюминия и молибдена. Детали конструкционного назначения (втулки, планки, вкладыши) из спеченного титанового сплава 2M2A имеют механические свойства на уровне литых и штампованных заготовок (табл. 1). Такие детали работают в узлах самолетных и вертолетных двигателей с рабочей температурой до 350°C : Як-42 (двигатель Д-36); Як-40 (двигатель АИ-25); Ан-70, Ан-72, Ан-74 (двигатель Д-27), вертолет Ми-24 (двигатель ТВ3-117) и другие [7].

Новым направлением в технологии изготовления титановых сплавов из смеси порошков является применение гидрида титана TiH_2 взамен титанового порошка. Экономически эффективная технология произ-

водства титановых сплавов и изделий методом прессования и спекания смесей порошковых компонентов на основе TiH_2 без применения дополнительных технологических операций (ГИП) разработана в Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. Использование порошка TiH_2 вместо традиционного порошка Ti оказывает положительное влияние на процесс синтеза титановых сплавов, обеспечивая ускоренную гомогенизацию системы и высокую конечную плотность [9].

Таблица 1 – Физико-механические свойства титановых сплавов 2М2А (спеченный), ВТ5Л (линейный) и ОТ-1 (деформируемый) [7]

Характеристика	Марка сплава		
	2М2А	ВТ5Л	ОТ4-1
γ , кг/м ³	4600	4410	4550
σ_e , МПа	≥ 700	780	600...750
δ , %	6,0...13,5	6	15
ψ , %	$\leq 28,5$	14	15
НВ, МПа	1600...2400	–	1970...2550
λ , Вт/м °С	13,8	13,0	13,4
$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С в диапазоне $T=20...400^\circ\text{C}$	9,1	9,1	8,8
c , кДж/кг·°С при $T=400^\circ\text{C}$	0,664	0,670	0,670
Метод изготовления	Прессование + спекание	Литье	Деформирование
КИМ	0,7...0,9	0,1...0,3	0,15

Гидридная технология опробована также в ОАО «Мотор Сич». Отмечается [10], что исходные порошковые материалы, используемые при производстве серийного титанового сплава 2М2А, достаточно дорогостоящие, в связи с чем более технологичным и экономически целесообразным является использование порошка TiH_2 взамен порошка титана ПТ5-1. За счет применения TiH_2 (3,87% H_2 ; 0,43 % O_2) при температуре спекания 1310...1340°С получен сплав с высокими механическими свойствами ($\sigma_e=705...726$ МПа) при удовлетворительных показателях пластичности ($\delta=6\%$, $\psi=8\%$) и твердости (НВ=2060...2330 МПа). Свойства полученного сплава соответствуют уровню серийного титанового сплава 2М2А ($\sigma_e \geq 686$ МПа, $\delta \geq 6\%$, $\psi \geq 8\%$, НВ=1570...2350 МПа). Наряду с высоким уровнем механических свойств полученный сплав не

требует дополнительной шихтовки дорогостоящими легирующими элементами в сравнении со сплавом 2M2A [10].

По гидридной технологии синтезированы сплавы $Ti-6Al-4V$, $Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr$ и $Ti-10V-2Fe-3Al$ [9]. Сплав $Ti-6Al-4V$ является наиболее распространенным в мире титановым сплавом, широко применяемым в авиастроении. При синтезе сплавов $Ti-6Al-4V$ по простейшей технологии прессования и спекания применяли порошки Ti с размером частиц <100 мкм, полученные методом гидрирования-дегидрирования титановой губки, и TiH_2 с размером частиц <100 мкм (3,2% H_2), взятых после первой стадии этого процесса. Легирующие добавки вводили в виде элементарных порошков (ЭП) или порошков лигатур (ПЛ). Также использовали элементарные порошки повышенной дисперсности (ДЭП) [9].

При синтезе сплава $Ti-6Al-4V$ из смеси на основе порошка Ti плотность как сырых прессовок, так и спеченного материала существенно зависит от давления. Изменение типа легирующих добавок слабо влияет на плотность сырых прессовок, однако оказывает значительное действие на конечную плотность. Минимальную конечную плотность имеет сплав, полученный из смеси ЭП. Плотность существенно повышается при замене ЭП на ДЭП и, особенно, на ПЛ [9].

Оптимальное сочетание прочности и пластичности порошкового сплава $Ti-6Al-4V$ достигается при использовании смеси $Ti-6Al-4V$ ПЛ. В таком материале достигнут достаточно высокий предел усталости 450...500 МПа. Незначительная остаточная пористость, дисперсная микроструктура и приемлемое содержание примесей обеспечивают свойства синтезированного сплава $Ti-6Al-4V$ на уровне, соответствующем литому или деформированному состоянию. Синтезированный сплав $Ti-8Mn$ демонстрирует высокие свойства на растяжение. Свойства такого сплава могут быть дополнительно улучшены термической обработкой [9].

Высоколегированные титановые сплавы псевдо- β -класса имеют наиболее высокие значения удельной прочности среди титановых сплавов и значительный потенциал для оптимизации комплекса механических свойств термической обработкой. Такие сплавы имеют $\sigma_e \leq 1600$ МПа, что делает их весьма привлекательными для использования в качестве конструкционных материалов. Наиболее распространенные сплавы данного класса $Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr$ и $Ti-10V-2Fe-3Al$ широко применяются в современном самолетостроении [11].

Для синтеза указанных сплавов в качестве основы порошковой смеси использовали TiH_2 с размером частиц <100 мкм (3,5% H_2), легирующие элементы вводили в виде порошков лигатур состава

27,8Al – 27,8V – 27,8Mo – 16,6Cr и 66,67V – 13,33Fe – 20Al. Использование лигатур, строго соответствующих содержанию всех легирующих элементов в сплавах, упрощает процесс изготовления исходных порошковых смесей. Такие лигатуры технологически удобны, поскольку из-за своей хрупкости легко измельчаются до требуемой дисперсности. Кроме того, при нагревании до температуры спекания указанные лигатуры не склонны к образованию легкоплавких эвтектик, способных существенно замедлить процесс уплотнения [11].

Характеристики сплавов $Ti - 5Al - 5V - 5Mo - 3Cr$ и $Ti - 10V - 2Fe - 3Al$, полученных компактированием при давлении 750 МПа и спеканием в течение 4 ч при температурах 1250 и 1350 °С, приведены в таблице 2 [11].

Таблица 2 – Свойства спеченных титановых сплавов [11]

Сплав	$T_{сп}$, °С	Средний размер зерна, мкм	П, %	Средний размер пор, мкм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{ϵ} , МПа	δ , %	ψ , %
$Ti - 10V - 2Fe - 3Al$	1350	159	2,8	10,5	939	1033	12,0	19,5
	1250	105	4,0	11,3	944	1033	8,0	13,5
$Ti - 5Al - 5V - 5Mo - 3Cr$	1350	102	1,6	7,0	1025	1111	10,9	14,0
	1250	87	2,4	7,2	1029	1108	6,0	8,2

Прирост в прочности и пластичности при повышении температуры до 1350 °С связан с уменьшением как общей пористости, так и среднего размера пор. Прочность и пластичность синтезированных сплавов сравнимы с соответствующими показателями для данных сплавов в литом/горячедеформированном состоянии. Такой комплекс механических свойств достаточен для практического применения данных сплавов и изделий из них. При этом его можно существенно улучшить последующей термической обработкой [11].

Как было отмечено выше, другое направление развития технологии порошковой металлургии титановых сплавов связано с использованием легированных порошков титана. Основными способами получения легированных порошков титана являются плазменное распыление вращающегося электрода и распыление расплава с быстрым затвердеванием частиц порошка. При этом уровень свойств готового материала (в том числе и усталостных) должен быть не ниже, чем у материалов, изготавливаемых методами традиционного металлургического передела. Метод распыления позволяет дополнительно легировать сплав редкоземельными металлами, что при легировании, например, *Eu* или *Nd*

повышает жаропрочность сплава в 1,5 раза. Легированные порошки титана также используются для изготовления деталей из наиболее распространенного сплава титана $Ti-6Al-4V$ методом ГИП при температуре $920^{\circ}C$ в течение 3 ч в среде аргона под давлением 0,015 МПа [5].

Чтобы повысить усталостную прочность металлокерамических сплавов до уровня литых, необходимо снизить количество оксидных включений в порошке, уменьшить их размеры, а также совершенствовать процесс компактирования. Малейшие примеси таких загрязнений как Al_2O_3 и SiO_2 резко снижают физико-механические свойства сплава [5].

Фирма Nuclear Metals Incorporation (США) изготавливает легированные порошки титановых сплавов методом плазменного распыления вращающегося электрода, а детали из них – методом ГИП в керамических формах. Методы распыления и ГИП позволили повысить КИМ с 28 до 81 %, снизить стоимость производства на 25...35 %, повысить однородность, усталостные и коррозионные свойства сплавов и значительно сократить продолжительность цикла [5].

Фирма Crucible Materials Corporation (США) описанным методом разработала сплав $Ti-10V-2Fe-3Al$, который имеет $\sigma_{0,2}=1200$ МПа, $\delta=5\%$, $\psi=10\%$. Применение этого сплава для изготовления шасси самолета позволило уменьшить массу шасси на 22 %. Сплав $Ti-10V-2Fe-3Al$ конкурентоспособен с высоколегированной сталью [5].

Новая порошковая (гранульная) металлургия имеет следующие принципиальные отличия от традиционной:

- в качестве исходного материала служат не механические смеси дисперсных порошков чистых металлов и лигатур, а легированные микрогранулы, каждая из которых имеет заданный химический состав;

- компактирование производится в герметичных вакуумированных капсулах при высоких температурах (благодаря чему достигается высокая химическая однородность и 100 %-ная плотность получаемых изделий) [12].

Легированные порошки-микрогранулы получают распылением жидкого сплава в вакууме или атмосфере инертного газа, поэтому они не содержат оксиды и посторонние примеси. Частицы имеют правильную сферическую форму, что обеспечивает постоянство насыпного веса. Важным технологическим преимуществом сферических легированных порошков является отсутствие пиррофорности, поскольку они не содержат пылевидной фракции. По сравнению с фасонным литьем изделия из микрогранул имеют более дисперсную микро- и макроструктуру благодаря высокой скорости охлаждения расплава в процессе гранулирования, что благоприятно сказывается на комплексе механических свойств [12]. Преимуществом гранульной металлургии также является увеличение КИМ по сравнению даже с фасонным литьем [13].

Компактирование титановых гранул осуществляют методами изостатического уплотнения всесторонним сжатием и экструдирования через матрицу. При первом варианте уплотнения в газо- и гидростатах взаимное перемещение гранул почти отсутствует, а получаемая конфигурация изделия представляет геометрическое подобие исходной формы, уменьшенное на величину усадки гранул при уплотнении. Экструдирование сопровождается значительным перемещением гранул относительно друг друга и изменением их формы, которое намного больше, чем в первом случае. Экструдирование, проводимое в герметичных вакуумированных капсулах, является более надежным методом, чем изостатическое уплотнение, и поэтому более предпочтительным для получения прутков, профилей и труб. Детали сложной формы можно изготавливать только ГИП в газостатах (газостатированием) фигурных капсул с порошком [14]. В некоторых случаях, в частности для получения высококачественных дисков ГТД, после газостатирования применяют дополнительную штамповку заготовок по обычной технологии.

В настоящее время разработана широкая номенклатура титановых сплавов для авиационной и ракетно-космической техники, которые можно получать методом гранульной металлургии: ВТК-1КТ (α -сплав); ВТ18У (близкий к α -сплавам); ВТ6, ВТ8, ВТ3-1, ВТ25У, ВТ23 ($\alpha + \beta$ -сплавы); ВТ22 (близкий к β -сплавам) [15].

Структура дисков, как и исходных шайб, мелкозернистая и соответствует 2-3 баллам шкалы ВИАМ. Диски из гранул сплава ВТ9 имеют следующие механические свойства: $\sigma_e = 1200$ МПа, $\delta = 7 \dots 12\%$, $\psi = 32 \dots 41\%$, $\sigma_e^{500} = 730 \dots 740$ МПа [14].

Прутки получают горячей экструзией (при температуре $900 \dots 1000^\circ\text{C}$) гранул, свободно насыпанных в вакуумированные стальные капсулы, на гидропрессе. Для получения 100%-ной плотности обжатие по диаметру составляет не менее 3 [14].

Механические свойства прутков [14]:

- из сплава ВТ9: $\sigma_e = 1220$ МПа, $\delta = 9\%$, $\psi = 19\%$, $\sigma_e^{500} = 900$ МПа;
- из сплава ВТ18: $\sigma_e = 1270$ МПа, $\delta = 10\%$, $\psi = 12\%$, $\sigma_e^{500} = 1010$ МПа;
- из сплава ВТ6: $\sigma_e = 1110$ МПа, $\delta = 14\%$, $\psi = 35\%$, $\sigma_e^{500} = 670$ МПа;
- из сплава ВТ25: $\sigma_e = 1290$ МПа, $\delta = 8\%$, $\psi = 11\%$, $\sigma_e^{500} = 1020$ МПа.

Микрогранулирование с последующим горячим компактированием обеспечивает более высокую прочность и пластичность, чем традиционная технология, поскольку литые гранулы имеют гораздо более тонкую структуру, чем крупные промышленные слитки.

В настоящее время перед разработчиками титановых сплавов стоят задачи повышения механических свойств до $\sigma_e = 1300 \dots 1400$ МПа, $\sigma_e / g\gamma = 29$ км, $E = 200$ ГПа при сохранении требуемых параметров. Од-

ним из путей достижения этого является получение сверхмелкого зерна в полуфабрикатах в результате сверхбыстрой кристаллизации при производстве гранул и изометрической деформации в условиях сверхпластичности [4].

Возможности реализации метода последовательного расширения полноты критериальной оценки эффективности использования спеченных порошковых материалов в агрегатах авиаконструкций для титановых спеченных сплавов при сегодняшнем уровне доступных опытных данных еще более ограничены, чем для алюминиевых сплавов, проанализированных нами в [1].

Тем не менее проведем анализ таких возможностей для каждого из весьма комплексных критериев, эффективности, содержащихся в блок-схеме работы [15].

Прямые данные по составляющим комплексного критерия «Надежность», групповым критериям «Безотказность», «Долговечность», «Сохраняемость» и «Ремонтопригодность» отсутствуют. Однако нет и сведений о том, что эти критериальные показатели для спеченных порошковых титановых сплавов ниже, чем для литейных и деформируемых сплавов. Это дает косвенное основание полагать, что численные значения относительного комплексного критерия «Надежность» близко к единице. Аналогичное заключение можно сделать и для комплексного критерия «Нормированная среда эксплуатации».

Опытные данные по составляющим комплексного относительного критерия «Показатели стоимости» также отсутствуют. Однако в [2] с ссылками на [4 – 6] отмечается, что привлечение методов порошковой металлургии для изготовления деталей из сплавов титана позволяет снизить стоимость изделий в 2 – 3 раза.

Отмеченное выше в [5] снижение стоимости производства на 25...35 % по-видимому относится не к стоимости всего процесса изготовления изделий, включающего в себя кроме стоимости самого материала еще и стоимость оснащения, собственно технологических процессов производства изделия, а также контроля и заработной платы участников производства. В такой трактовке снимается противоречие между объемами снижения стоимости изделий из спеченных порошков титана в 2 – 3 раза и снижением стоимости производства порошка как исходного материала для изделия как составляющей показателя стоимости, определяемого комплексным критерием эффективности [15]. Приведенные данные позволяют принять, что относительный комплексный критерий эффективности повышения эксплуатационных характеристик самолета «Показатели стоимости» составляет $\bar{R}_{\text{компл. стоим.}} = (2...3) \gg 1$.

Как показано выше, существенное различие в свойствах спеченных и традиционных титановых сплавов имеет показатель использования материала КИМ. Несмотря на крайне ограниченное количество данных

можно ориентироваться на среднюю цифру для КИМ спеченных порошковых материалов, равную $(0,7...0,9)=0,8$. В то время как для традиционных титановых сплавов в процессе их переработки в изделия среднее значение КИМ составляет $(0,1...0,3)=0,2$.

Таким образом, по расходу дорогостоящих титановых сплавов эффективность спеченных материалов, определяемая относительным групповым показателем $\bar{R}_{КИМ}$, являющимся одной из 10 составляющих комплексного критерия «Технологичность» [9]

$$\bar{R}_{КИМ} = \frac{R_{КИМ\text{ком.}}}{R_{КИМ\text{трад.}}} = \frac{0,81}{0,28} = 3.$$

В [5] также отмечается, что применение спеченных порошковых титановых сплавов позволяет снизить массу изделий на 70%, по-видимому, за счет их более высоких прочностных и упругих характеристик σ_{ϵ} и E по сравнению с традиционными литейными и деформируемыми титановыми сплавами.

По-видимому, эти противоречивые данные, приводимые в одном и том же источнике, следует принимать как диапазон снижения массы изделий за счет использования различных спеченных порошковых титановых сплавов в разных изделиях авиационного назначения. Тогда среднее снижение массы равно $(22...70)\%=46\%$ может трактоваться как еще один групповой показатель относительного комплексного критерия эффективности «Технологичность» [15]:

$$\bar{R}_m = \frac{R_{\text{мотн.}}}{R_{\text{ттрад.}}} = \frac{1}{0,46} = 2,17.$$

Обращаясь к номенклатуре групповых показателей технологичности, приведенной в работе [15], и полагая, что из 10 этих показателей остальные 8 не ниже их аналогов для деталей из традиционных титановых сплавов, то есть их относительные групповые критерии эффективности замены не ниже единицы и, принимая (в запас) коэффициенты значимости равными, получим приблизительное значение относительного комплексного критерия технологичности, определенное по методике [1]: $\bar{R}_{\text{техн.}}^{\text{компл.}} = (3 + 2,17 + 8) \cdot 0,1 = 1,3 > 1$, что свидетельствует об эффективности замены традиционных титановых сплавов на спеченные аналоги.

Несмотря на практически равную плотность спеченных порошковых и деформируемых сплавов групповые составляющие комплексного критерия «Весовая отдача» обеспечивают ему числовое значение $\bar{R}_{\text{вес.отд.}}^{\text{компл.}} = (\bar{R}_{\text{уд.ж.}} + \bar{R}_{\text{уд.проч.}} + \bar{R}_{\gamma}) \cdot \beta$, где $\bar{R}_{\text{уд.ж.}}$, $\bar{R}_{\text{уд.проч.}}$, \bar{R}_{γ} – относительные групповые критерии эффективности соответственно удельной жесткости по модулю упругости E , удельной прочности по пределу

прочности при растяжении σ_{ϵ} и плотности материалов γ ; β – равные коэффициенты значимости относительных групповых критериев ($\beta=0,33$).

Приняв $E_{\text{спеч.}} = E_{\text{баз.}} = 110$ ГПа, $\gamma_{\text{спеч.}} = 4,6$ г/см³, $\gamma_{\text{баз.}} = 4,5$ г/см³, $\sigma_{\text{вспеч.}} = 1200$ МПа, $\sigma_{\text{вбаз.}} = 500$ МПа, в соответствии с осредненными соответствующими данными таблицы 1, получим приблизительное значение относительного комплексного критерия эффективности «Весовая отдача» [9], равное $\bar{R}_{\text{вес.отд.}} = (0,323 + 0,776 + 2,17) \cdot 0,33 = 1,18 > 1$.

Рассмотрим возможности оценивания относительного комплексного показателя эффективности «Показатели качества».

В откорректированной в [15] номенклатуре групповых показателей качества содержится 8 наименований: назначения, экономичного использования сырья, эргономические, эстетические, транспортабельности, патентно-правовые, экологические и безопасности. Числовые данные по всем этим критериям по-видимому отсутствуют.

Из приведенного выше перечня групповых критериев по видимому можно принять равнозначными для спеченных и традиционных титановых сплавов все кроме критериев «Экономичного использования сырья» и «Патентно-правовые показатели». Что касается первого из этих двух, то он по-видимому прямо коррелирует с критерием номенклатуры групповых показателей технологичности «Коэффициент использования материала КИМ», а также «Стоимость материала» в групповых показателях стоимости.

Что касается групповых критериев, входящих в комплексный критерий «Предельные состояния» как спеченных порошковых, так и литейных и деформируемых титановых сплавов, то сведения по их численным значениям, как показал проведенный выше анализ, весьма малочисленны и не полные.

В таблице 3 собраны эти данные для 11 спеченных порошковых, а в таблице 4 – для традиционных титановых сплавов.

Как уже отмечалось выше, сравниваемые свойства существенно отличаются между собой в зависимости от технологии получения материала и его состава. В целом же по имеющимся в таблицах 3 и 4 данным трудно оценить эффективность замены традиционных сплавов порошковыми. В [5] отмечается, что в целом уровень свойств спеченных порошковых материалов, в том числе усталостных и характеристик пластичности не ниже, чем у материалов, изготовленных традиционными технологиями, это же отмечается в работе [8].

Сравнивая пределы прочности литейных и порошковых материалов по таблицам 1 – 2, можно констатировать, что спеченные порошковые материалы не уступают традиционным титановым сплавам и по этому групповому критерию эффективности.

Таблица 3 – Прочностные и деформационные свойства спеченных титановых сплавов

№ п/п	Марка сплава	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	2M2A	≥ 700	–	6...19,5
2	<i>Ti – 6Al – 4V</i> , ПЛ	880	830	3
3	<i>TiH₂ – 6Al – 4V</i> , ДЭТ	970	920	≤ 10
4	<i>TiH₂ – 6Al – 4V</i> , ПЛ	970	850	12,5
5	<i>TiH₂ – 8Mn</i> , ПЛ	990	910	7,4
6	<i>Ti – 10V – 2Fe – 3Al</i>	1033	939...944	12,0
7	<i>Ti – 5Al – 5V – 5Mo – 3C</i>	1110	1025...1029	6,0...10,9
8	BT-9	1220	–	9
9	BT-18	1270	–	10
10	BT-6	1100	–	14
11	BT-25	1290	–	8
	среднее	1050	913	10,7

Таблица 4 – Прочностные и деформационные свойства литейных и деформируемых титановых сплавов

№ п/п	Марка сплава	γ , г/см ³	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_R , МПа	E , ГПа	KCU (a_H)
1	BT 5Л (литье)	4,41	780	–	6	–	–	–
2	OT4-1 <i>Ti – 2Al – 1,5Mn</i>	4,55	600... 750	370... 570	15...30	–	110	4,5
3	BT1-00 (ПТ-1М)	4,5	300... 450	270	20...25	–	110	12
4	BT1-0, ПТ-1М	–	400... 550	386	20...30	–	110	6...10
5	ПТ-7М	–	471... 667	392... 588	20...30	255	–	8...12
6	BT6C	4,45	850... 1000	820	8...13	300... 500	115... 120	4...5
7	BT 6	4,43	1000.. 1150	900... 1000	6...10	430	125	3...5
8	BT 16	4,68	830... 1200	820	10...14	440	107	–
9	BT 3-1	4,5	1000... 1200	–	6...10	–	80... 115	–
10	BT 22	4,62	1100... 1150	1050... 1150	10...16	–	110	3,5...6
11	T 110	–	1100	1083	15...21	–	–	3,5...4,8
	среднее		865... 1000	640	13...18	380	110	6,5

Выводы

1. В развитие концептуального подхода к критериальной оценке возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций, получаемых методами порошковой металлургии, реализован ранее предложенный метод ограничения полноты располагаемого объема свойств применительно к порошковым материалам на основе титановых сплавов.

2. Предложенный метод применительно к спеченным титановым сплавам позволяет последовательно по мере накопления данных о свойствах заменяющих порошковых сплавов расширять до потребной степени полноты и достоверности область эффективного внедрения спеченных порошковых титановых сплавов, охватывая необходимую номенклатуру деталей как по отдельным наиболее важным комплексным критериям для тех или иных условий эксплуатации самолета, так и постепенного приближения в прогнозах к интегральному критерию многоуровневой критериальной оценки.

3. Проанализированные выше данные в рамках предложенного метода последовательного расширения полноты критериальной оценки использования спеченных порошковых материалов на основе титана позволяют констатировать эффективность замены ими традиционные титановые сплавы.

Список использованных источников

1. Бычков, А.С. Метод последовательного расширения полноты критериальной оценки эффективности использования спеченных порошковых материалов в агрегатах авиаконструкций. Сообщение 1. Спеченные порошковые материалы на основе алюминия [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: Сб. науч.тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 1(93). – Х., 2018. – С. 53 – 64.

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

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

4. Шалин, Р.Е. Материалы аэрокосмической техники [Текст] / под ред. акад. РИАН Р.Е. Шалина // Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков. – М.:ВИАМ, 1991. – С. 49 – 63.

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

6. Порошковая металлургия и напыленные покрытия [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

7. Исследование влияния режима спекания на свойства порошкового материала 2М2А [Электронный ресурс] / З.В. Леховцев, И.А. Герасименко, Г.Я. Мирошниченко, И.О. Быков. – Режим доступа: [http // www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural / smm/ ssh / 2009 3/ statyi tom 3 / 19.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/smm/ssh/2009_3/statyi_tom_3/19.pdf).

8. Порошковые титановые материалы для изготовления крепежных гаек [Текст] / Г.Ф. Авкимович, В.С. Раковский, К.М. Борзцовская, Т.И. Болотина // Порошковая металлургия, 1974 – № 12. – С. 89 – 93.

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

10. Применение гидрированного титана с заданным содержанием кислорода для получения изделий методом порошковой металлургии [Текст] / И.О. Быков, А.В. Овчинников, С.И. Давыдов и др. // Теория и практика металлургии, 2011. – № 1-2. – С. 65 – 69.

11. Матвийчук, М.В. Синтез высоколегированных титановых сплавов методом порошковой металлургии [Текст] / М.В. Матвийчук, Д.Г. Саввакин // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении, 2010. – № 1. – С. 81 – 84.

12. Глазунов, С.Г. Уникальное оборудование для новой технологии металлов [Текст] / С.Г. Глазунов, К.К. Ясинский // Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков. – Под ред. акад. РИАН Р.Е. Шалина. – М.: ВИАМ, 1999. – С. 166 – 171.

13. Береснев, А.Г. Гранульные и порошковые материалы для авиакосмической техники [Текст] / А.Г. Береснев, И.М. Разумовский // Композиционные материалы в промышленности: 28-ая междунар. конф., Ялта: материалы конф. – К.: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. – С. 309 – 312.

14. Глазунов, С.Г. Новая порошковая металлургия титановых сплавов [Электронный ресурс] / С.Г. Глазунов // Авиационная промышленность, 1982. – № 8. – Режим доступа : www.viam.ru/public.

15. Бычков, А.С. Концептуальный подход к критериальной оценке возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций, формуемых методами порошковой металлургии [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (92). – Х., 2017 – С. 42 – 54.

Поступила в редакцию 21.05.2018.

Рецензент: канд. техн. наук, О.Ю. Нечипоренко, ГП «Антонов», г. Киев.