

Новый класс титановых полуфабрикатов – пористый титан

Автор, докладчик – Корнилова Мария Анатольевна,
начальник лаборатории титанового слитка НТЦ

Соавторы – М.О. Ледер, И.Ю. Пузаков, Н.В. Щетников, Е.В. Чухина

Задачи и цель работы

1. Получить опытные образцы пористого титана по разным технологиям с подбором оптимальных параметров.
2. Провести испытания образцов: металлографическое исследование, механические свойства.
3. Определить потенциальные области применения.
4. Изготовить опытные образцы для проведения целевых испытаний.

Пористые металлы - пенометаллы

Пенометаллы – металлы или сплавы ячеистой структуры, состоящие из твёрдого металла с заполненными газом порами, составляющими значительную часть объёма.

Новый класс материалов, имеющих крайне низкую, регулируемую плотность в сочетании с высокой удельной прочностью и шумопоглощением, низкой теплопроводностью.

Широкий спектр применения:

амортизаторы ударной и взрывной энергии,
фильтрующие элементы,
пористые электроды,
глушители,
теплообменники,
катализаторы,
элементы шумоизоляции,
конструкционные материалы (сэндвич-панели),
биомедицинские импланты.



50% – транспорт (авто, судостроение, ж/д) в качестве демпфирующих и конструкционных материалов

20% – авиакосмос для демпфирующих и термоизоляционных материалов

30% – прочее, в т. ч. строительство, медицину

Более 30% рынка занимает пеноалюминий,
за ним идут магний, никель и медь.
~5% - пенотитан.

Пористый титан - пенотитан

Преимущества пористого титана:

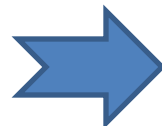
Биосовместимость

Высокий уровень механических свойств

Высокая химическая стойкость

Высокая коррозионная стойкость

Низкая плотность



Область применения:

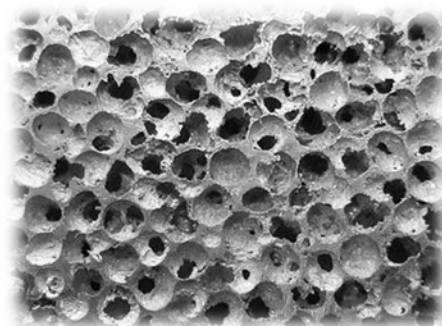
Биомедицина (импланты)

Конструкционное применение в аэрокосмических и подводных аппаратах

Демпфирующие элементы

Фильтрующие элементы

Использование при повышенной температуре в теплообменниках, катализаторах



Методы получения пенометаллов

В жидком состоянии:

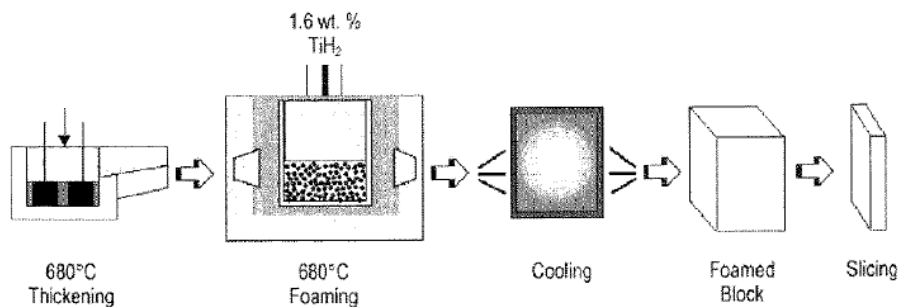
Вспенивание расплава металла пропусканием инертного газа

Добавление в шихту порообразующего материала (гидрид титана, циркония), который при плавлении матрицы выделяет водород с образованием пор.

Литье по выплавляемым моделям

Инфильтрация расплава под высоким давлением и др.

Пример технологии с добавлением порообразующего материала в расплав алюминия:



В твердом состоянии:

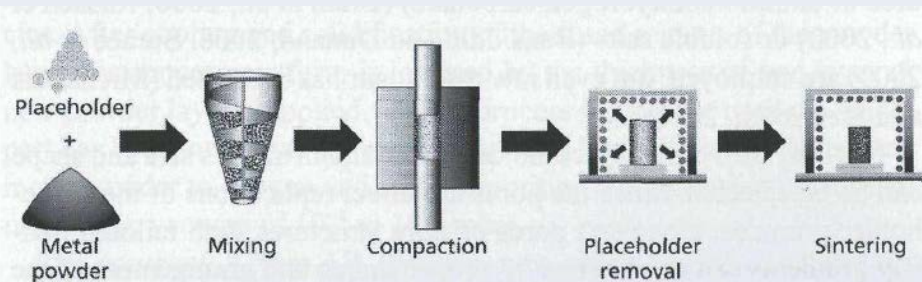
Компактирование порошков с порообразующим материалом

Спекание порошков

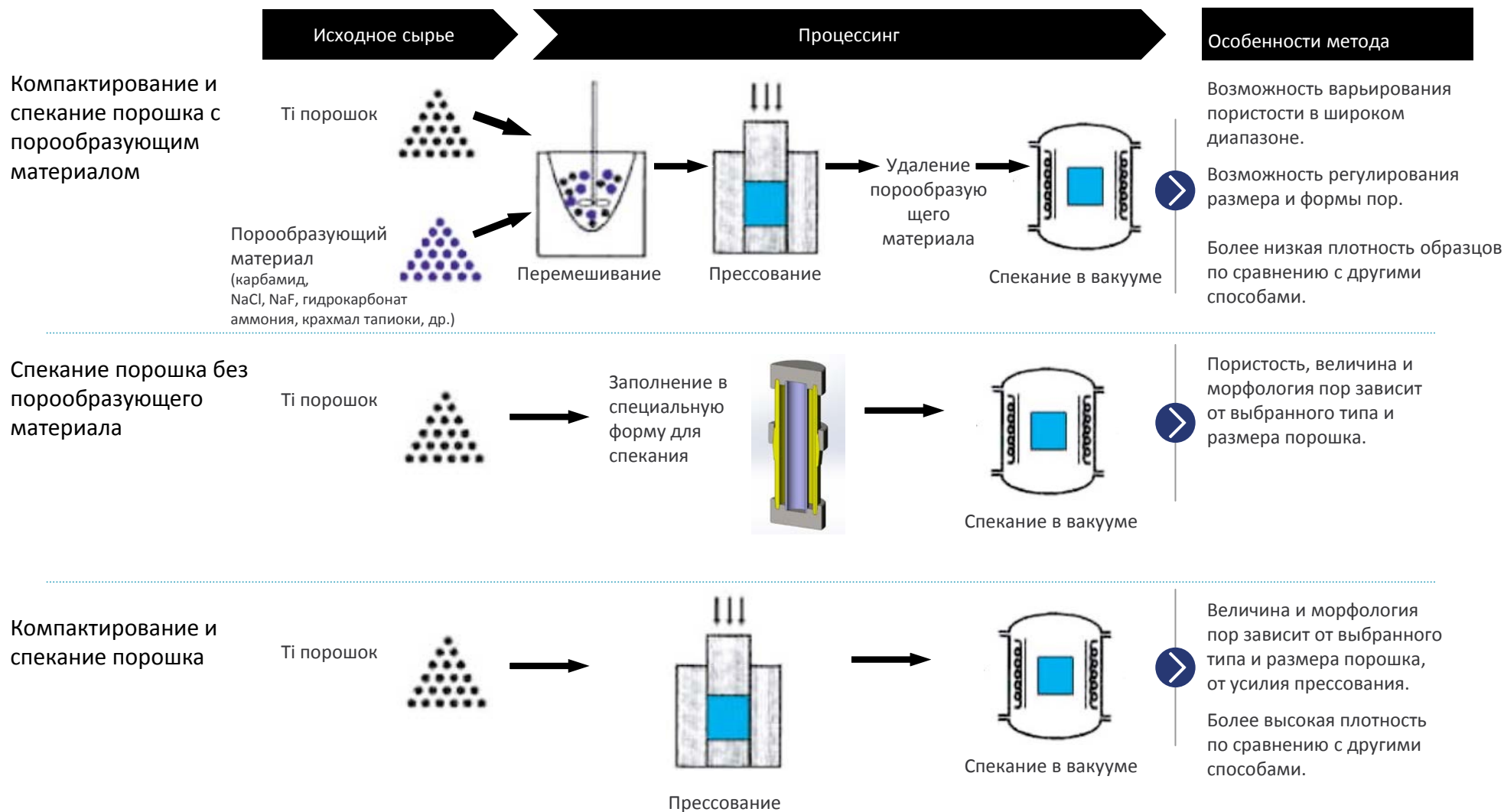
Компактирование и спекание порошков

Вспенивание суспензии и др.

Пример технологии компактирования порошка с добавлением порообразующего материала:



На ВСМПО были опробованы 3 технологии получения пенотитана



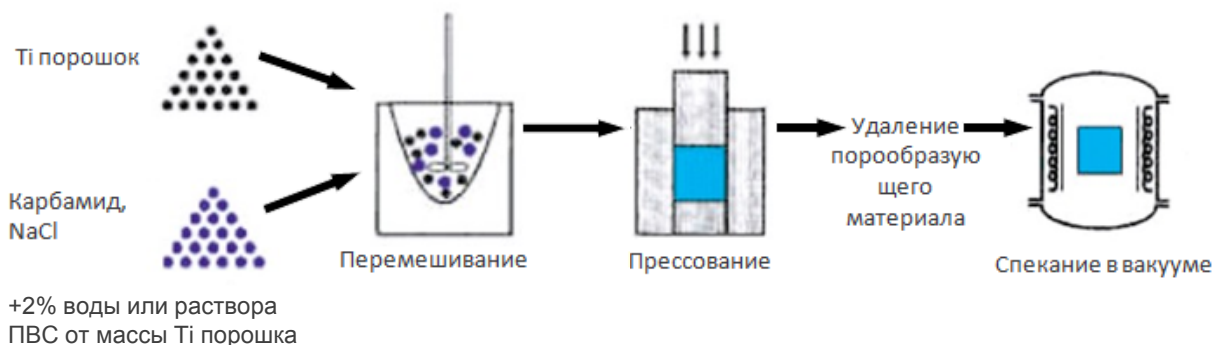
Спекание порошка с порообразующим материалом

Исходный порошок	Порообразующий материал	Размеры образца
Несферичный порошок сплава Gr2 фр. <150 мкм Несферичный порошок сплава Ti6Al4V фр. <125 мкм Сферичный порошок сплава Ti6Al4V фр. <45 мкм Несферичный порошок АВИСМА марок: ТПП-4 фракцией 0-1 мм ТПП-6 фракцией 0,306-0,63 мм ТПП-7 фракцией 0,16-0,306 мм ТПП-8 фракцией 0-0,16 мм	Карбамид (мочевина) фракцией <2 мм Соль NaCl фракцией <125 мкм	Ø 35 мм Ø 45 мм Ø 200 мм Ø 850 мм







$$\frac{W_{Ti}}{W_x} = \rho_{Ti} \left[\frac{(1 - V_x)}{(\rho_x \cdot V_x)} \right]$$

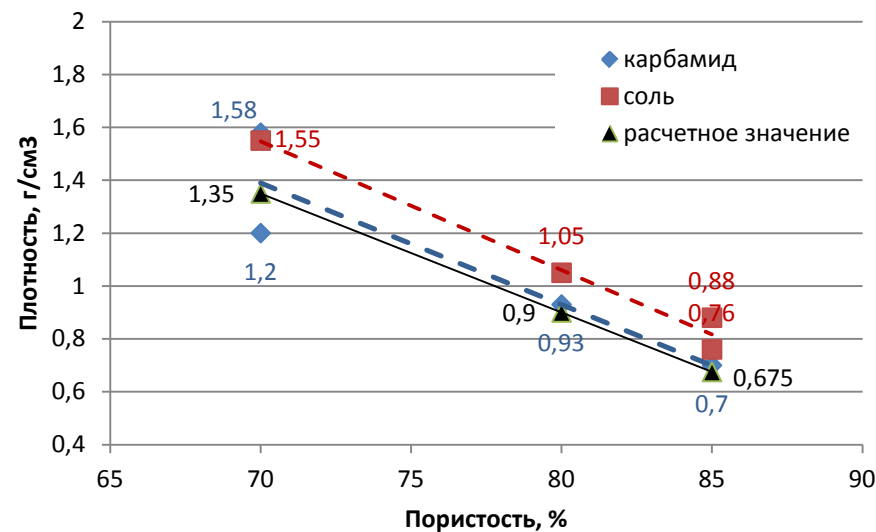
где W_{Ti} – масса порошка, W_x – масса порообразующего материала, ρ_{Ti} и ρ_x – плотность титана и порообразующего материала, V_x – объемная доля порообразующего материала (пористость).

Целевая пористость: 70, 80, 85%



Спекание порошка с порообразующим материалом

Пористость	С карбамидом	С солью NaCl
70%	 <p>Gr2 №1-12</p> <p>Плотность 1,58 г/см³</p>	 <p>Gr2 №1-13</p> <p>Плотность 1,55 г/см³</p>
80%	 <p>Gr2 №1-14</p> <p>Плотность 0,93 г/см³</p>	 <p>Gr2 №1-15</p> <p>Плотность 1,05 г/см³</p>
85%	 <p>Gr2 №1-17</p> <p>Плотность 0,7 г/см³</p>	 <p>Gr2, №1-16</p> <p>Плотность 0,76 г/см³</p>



Спекание порошка с порообразующим материалом



Ø 45 мм



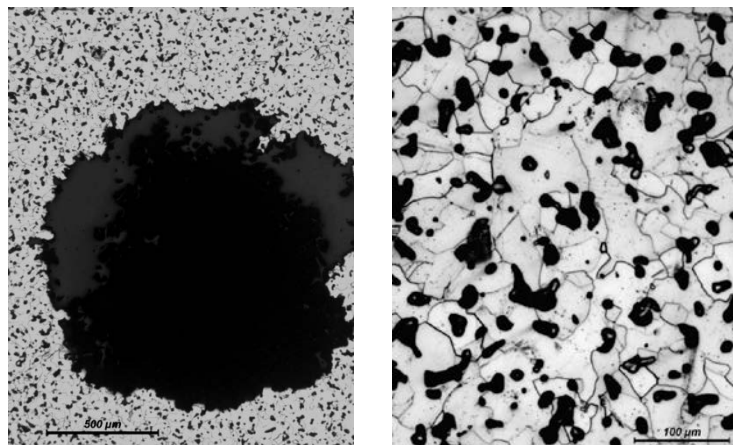
Ø 200 мм



Ø 850 x 22 мм
Порошок ТПП-7+карбамид
Плотность 1,3 г/см³

Спекание порошка с порообразующим материалом

карбамид

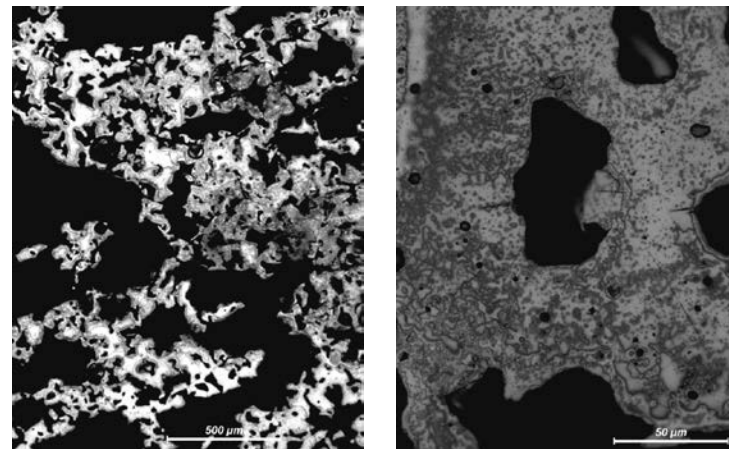


x50

x200

Макропоры – 0,4-2,1 мм
Микропоры – 8-38 мкм

NaCl



x50

x200

Макропоры – 0,29-1,8 мм
Микропоры – 21-68 мкм

Образец	Плотность, г/см ³	Истинное напряжение при сжатии, МПа
Несферичный порошок Gr2 фракцией 75-150 мкм + карбамид фракцией 1,6-2 мм	1,58	65-80
Несферичный порошок Gr2 фракцией 75-150 мкм + соль фракцией <125 мкм	1,55	35-40
Порошок марки ТПП-7 фракцией 160-306 мкм + карбамид фракцией 1,6-2 мм	1,3	20-40

Компактирование и спекание порошка

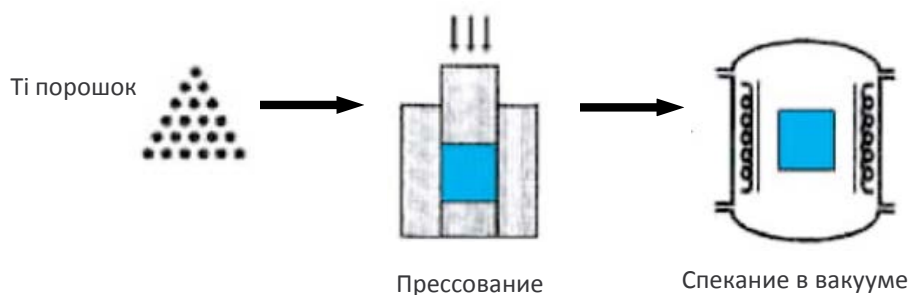
Исходный порошок	Размеры образца
Несферичный порошок AVISMA марок: ТПП-3 фракцией 1-3,2 мм	Ø 35 мм
ТПП-4 фракцией 0-1 мм	Ø 45 мм
ТПП-6 фракцией 0,306-0,63 мм	Ø 75 мм
ТПП-7 фракцией 0,16-0,306 мм	Ø 200 мм
ТПП-8 фракцией 0-0,16 мм	Ø 850 мм



Порошок ТПП-8
Ø35 мм
 $\rho=4,1 \text{ г/см}^3$



Порошок ТПП-4
Ø75 мм
 $\rho=3,5 \text{ г/см}^3$

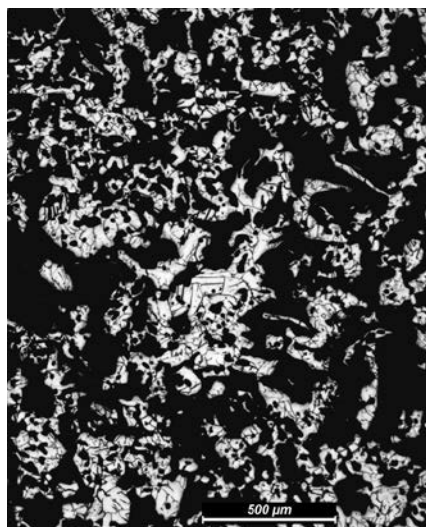


Порошок ТПП-7
Ø850 мм
 $\rho=2,55 \text{ г/см}^3$



Порошок ТПП-6
Ø200 мм
 $\rho=2,55 \text{ г/см}^3$

Компактирование и спекание порошка

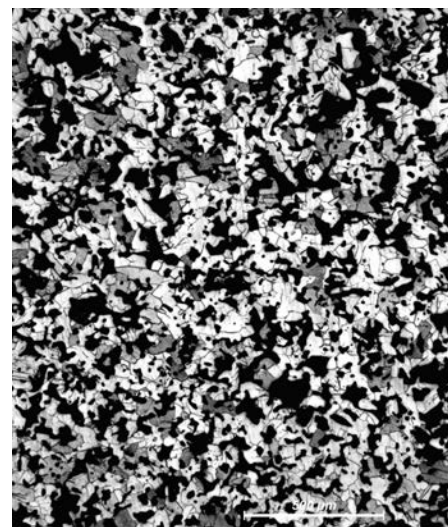


x50

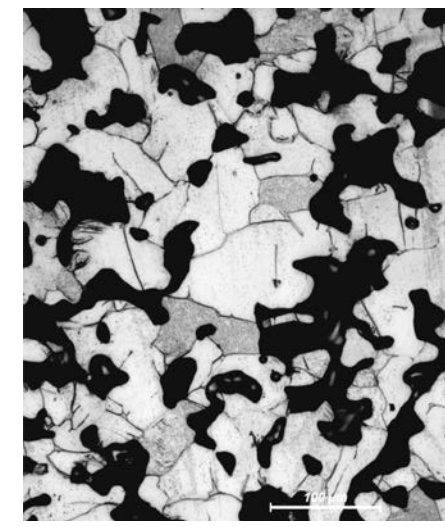


x200

ТПП-7



x50



x200

ТПП-8

Марка порошка	Фракция, мм	Размер пор, мкм
ТПП-3	1-3,2	470..1200 x 1600..2400
ТПП-4	0-1,0	500..560 x 1100..1280
ТПП-6	0,306-0,63	410..515 x 1200..1500
ТПП-7	0,16-0,306	250..470 x 920..1050
ТПП-8	0-0,16	300..360 x 345..475

Компактирование и спекание порошка

Уровень механических свойств

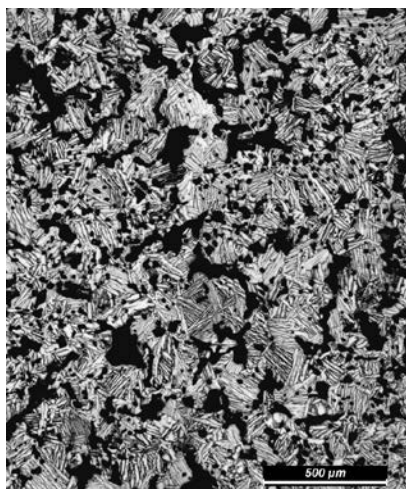
Марка порошка	Фракция, мм	плотность, г/см ³	Направление вырезки	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Отн. удл., %	Отн. сужение, %
ТПП-3	1,0 - 3,2	2,55	тангенциальное	29	34	14,8	0,4	2
			радиальное	32	33	12,7	0,4	1,6
ТПП-4	0 - 1	2,55	тангенциальное	-	37	4,9	0,2	1,2
			тангенциальное	-	42	21,3	0,2	1
			радиальное	55	60	8,6	-	-
ТПП-6	0,306 - 0,63	2,55	тангенциальное	39	45	-	2,4	-
			радиальное	48	48	2,7	0,2	2
ТПП-7	0,16 - 0,306	2,55	тангенциальное	68	68	18,7	1	1,4
			тангенциальное	66	67	15,4	0,6	1,6
			радиальное	91	96	29,2	-	-
			радиальное	78	86	23,0	-	-
ТПП-8	0 - 160	2,55	тангенциальное	163	179	37,7	0,4	2,6
			тангенциальное	148	184	34,2	-	-
			радиальное	126	170	25,4	0,2	0,4
			радиальное	116	175	30,1	0,2	1,6

Спекание порошка

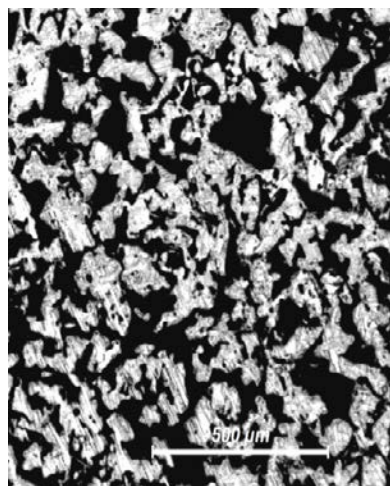
Исходный порошок	Форма и размеры образца
Несферичный порошок сплава Gr2 фр. <150 мкм Несферичный порошок сплава Ti6Al4V фр. <125 мкм Сферичный порошок сплава Ti6Al4V фр. <100 мкм Несферичный порошок AVISMA марок: ТПП-6 фракцией 0,306-0,63 мм ТПП-7 фракцией 0,16-0,306 мм ТПП-8 фракцией 0-0,16 мм	Стержень $\varnothing 20$ мм высотой до 150 мм Цилиндр $\varnothing 40$ мм высотой до 70 мм Диск $\varnothing 40$ мм толщиной 3-5 мм Труба $\varnothing 40$ x3мм и длиной до 150 мм



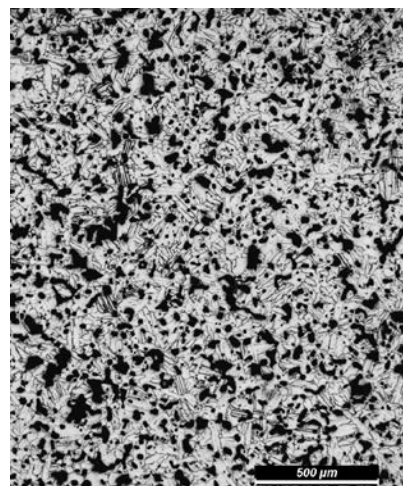
Спекание порошка



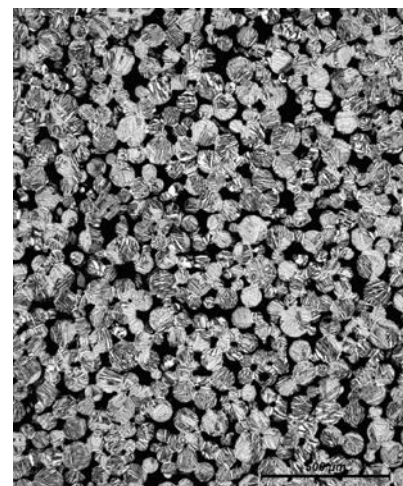
X50
ТПП-7 фр.160-306 мкм



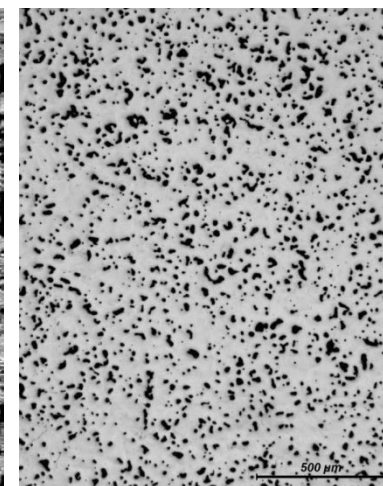
x50
Gr2 75-150 мкм



X50
ТПП-8 фр.0-160 мкм



x50
Ti6Al4V 15-45 мкм
сфер.



x50
Ti6Al4V 63-90 мкм

Марка порошка	Фракция, мкм	Размер пор, мкм
Ti6Al4V (несферический)	63-90	22..27
Ti6Al4V (несферический)	<125	120..140 x 170..340
Ti6Al4V (сферический)	15-45	20..35
Gr2 (несферический)	75-100	39..100
ТПП-6	306-630	430..530 x 680..970
ТПП-7	160-306	360..520 x 620..850
ТПП-8	0-160	250..590 x 310..760

Спекание порошка

Уровень механических свойств

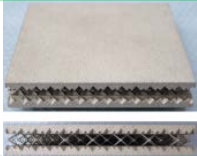



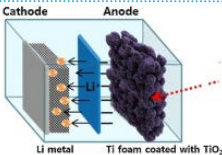
Вид порошка	Фракция, мкм	Плотность, г/см ³	Средний размер пор, мкм	Прочность, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Отн. удл., %	Отн. сужение, %	Истинное напряжение при сжатии, МПа
Несферичный порошок Gr2	75-150	2,6		55	19,4	1,2	2,6	-
	>150	2,8	45-69	33	15,4	-	-	-
	150-250	2,98	51-74	90	28,6	0,2	0,8	400
Несферичный порошок б-4	63-90	4,05	20-27	174	101,9	0,2	0,4	-
	<125	4,2	15-17	737	106,4	-	-	-
Порошок ТПП-8 АВИСМА	0-160	1,93	115-120	-	-	-	-	116
		2,74	51-85	-	-	-	-	120

Свойства полученных образцов пористого титана

Сводная таблица

Способ изготовления	Вид порошка	Размер пор, мкм	плотность, г/см ³	Истинное напряжение при сжатии, МПа	Временное сопротивление, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Отн. удл., %	Отн. сужение, %
Компактирование порошка с порообразующим материалом	<u>Несферичный</u> Сферичный	Макропоры: 300..2100 Микропоры: 8..68	0,7-1,58	20-80	-	-	-	-
Компактирование + спекание порошка	Несферичный	250..2400	2,5-2,6	350-370	33-184	4,9-37,7	0,2-2,4	0,4-2,6
Спекание порошка	Несферичный Сферичный	20..970	1,93-4,2	116-400	4-174	19,4-101,9	0,2-1,2	0,4-2,6

Варианты применения пенотитана

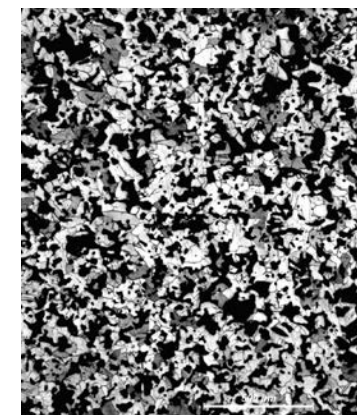
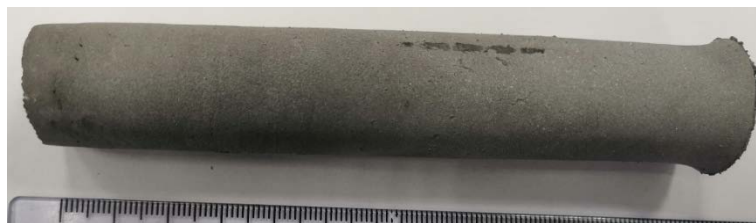
Пример применения	Описание	Уровень развития сегмента	Конкуренция с другими металлами
Гашение энергии 	Обшивка и демпфирующие изделия для гашения энергии	● Опытные работы, нишевые применения	● Алюминиевые и стальные конструкции, в т.ч. пористые
Медицина (импланты) 	Импланты	● Коммерческое использование	● Уникальное позиционирование за счет биосовместимости. Конкуренция с АТ.
Газовые и жидкостные фильтры 	Очистка бытовой воды, промышленных стоков, газов	● Коммерческое использование	● Уникальное позиционирование пенотитана (за счет коррозионных свойств)
Сэндвич-панели для аэрокосмоса¹ 	Обшивка, пол, внутренние перегородки	● Научно-исследовательские работы	● Керамические материалы, алюминий, сталь (напр., сотовые панели)
Топливные ячейки 	Пористые электроды, токоприемники	● Опытные работы, нишевые применения	● Никель, кобальт, алюминий
Прочие	Катализаторы, термоизоляторы, спортивный инвентарь	● Опытные работы, нишевые применения	● -

● Низкий
 ● Средний
 ● Высокий

1. Сэндвич-панели могут применяться как в автомобилестроении, так и в судостроении, однако применение титана в первую очередь может быть востребовано в аэрокосмической отрасли за счет высокого спроса на снижение веса изделия

Использование пористого титана для костных имплантатов в ортопедии и стоматологии

	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Истинное напряжение при сжатии, МПа
Свойства костей взрослого здорового человека	~2,4	55-150	10-19	78-170
Сплав Ti6Al4V ELI (ASTM F 136), пруток	4,43	min 860	110-120	-
Сплав Ti6Al7Nb (ASTM F 1295), пруток	4,52	min 900	110-120	-
Несферичный порошок Gr2 фракцией 75-150 мкм с карбамидом фракцией 1,6-2 мм. Прессование в матрицу + спекание	1,58	-	-	65-70
	1,58	-	-	75-80
Несферичный порошок Gr2 фракцией 75-150 мкм Спекание в форме стержня	2,6	55	19,4	-
	2,98	90	28,6	400
Порошок ТПП-7 АВИСМА фракцией 160-306 мкм Компактирование + спекание	2,55	67-96	15,4-23,0	350
Порошок ТПП-8 АВИСМА фракцией 0-160 мкм Компактирование + спекание	2,55	170-184	25,4-37,7	-



Фильтры

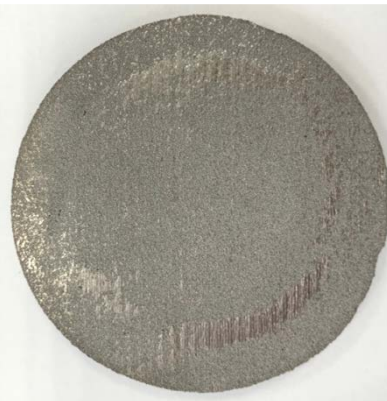
	Плотность, г/см ³	Размер пор, мкм	Размер макропор, мкм
Образец №1 (порошок ТПП-8, 0-160 мкм)	2,0	250-600	-
Образец №4 (порошок ТПП-7, 160-306 мкм)	1,7	360-830	-
Образец №3 (порошок ТПП-6, 306-630 мкм)	1,95	435-980	-
Образец №5 (порошок Ti6Al4V сфер. 15-45 мкм)	3,4	20-35	-
Образец №6 (порошок Ti6Al4V несфер. <125 мкм)	2,6	140-170 120-340	-
Образец №1-31 (порошок >150 мкм + карбамид)	1,42	15-55	900-2600
Образец №1-32 (порошок >150 мкм + карбамид)	0,99	10-65	800-2000
Образец №1-33 (порошок >150 мкм + соль)	1,35	15-80	80-1800
Образец №1-34 (порошок >150 мкм + соль)	2,09	-	-



Образец №1



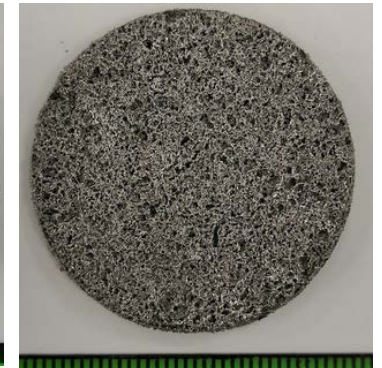
Образец №4



Образец №6



Образец №1-32



Образец №1-33

20

Заключение

1. В ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» проведен комплекс работ по отработке 3-х технологий и изготовлению пористых образцов титана с порами сферической и нерегулярной формы. Показана принципиальная возможность получения пористого титана по всем опробованным технологиям.
2. Проведены исследования характеристик и испытания механических свойств образцов пористого титана. Показана возможность получения образцов с плотностью в диапазоне от 0,7 до 4,2 г/см³ и пористостью до 70-85%.
3. Получены промышленные образцы пенотитана в форме плит габаритами до Ø850 мм толщиной до 25 мм с плотностью 1,2-2,6 г/см³, проведены исследования механических свойств.

ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» приглашает к сотрудничеству в вопросах исследования, разработки и промышленного применения изделий из пенотитана.

Благодарю за внимание!