

УДК 621.762

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО ТИТАНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ПОРОШКА TiH_2 , ОТ УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ В ИСХОДНОЙ СМЕСИ

© 2024 г. А. Б. Анкудинов¹, В. А. Зеленский¹, Н. П. Черезов^{2, *},
В. С. Ерасов³, В. С. Шустов¹, И. В. Сайков², М. И. Алымов^{1,2}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
Россия, 119334 Москва, Ленинский пр., 49

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Россия, 142432 Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8

³Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,

Россия, 105005 Москва, ул. Радио, 17

*e-mail: cherezovnikita@gmail.com

Поступила в редакцию 14.08.2023 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принята к публикации 19.01.2024 г.

Изготовлен пористый титан с высокой пористостью (более 59%) методом порошковой металлургии с использованием порообразователя — бикарбоната аммония (NH_4HCO_3). Изучено влияние доли порообразователя (0, 10, 20, 30 и 60%) в смеси, температуры и среды спекания на пористость и прочность пористого титана. Отмечается, что пористость образцов возрастает с увеличением доли порообразователя. Кроме того, значение пористости для образцов, спеченных в вакууме и в аргоне, различно. Прочность пористых образцов снижается с увеличением доли порообразователя и зависит от среды и температуры спекания. Установлено, что прочность образцов, спеченных в вакууме, как правило, выше и может достигать 1449 МПа. Температура спекания не сильно влияет на характеристики прочности пористых образцов при сжатии.

Ключевые слова: пористый титан, порошковая металлургия, испытания на сжатие, плотность, пористость

DOI: 10.31857/S0002337X24010037, **EDN:** MIJRPZ

ВВЕДЕНИЕ

Титан благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как прочность, плотность и коррозионная стойкость, нашел широкое применение в различных отраслях промышленности [1–11].

К настоящему времени разработано несколько методов получения пористого титана: спекание порошков титана без давления [12–15], спекание порошков титана под давлением [16–19], шликерное литье [20–21], аддитивные технологии [22–24], реакционное спекание [25], кальциетермическое восстановление [26, 27], избирательное выщелачивание компонентов сплава [28, 29], самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [30, 31].

В работе [31] компактный титан из гидридов получали методами порошковой метал-

лургии. Гидрированную губку размалывали в порошок, отсеивали фракцию 60–80 мкм, которую затем прессовали при давлении 300–400 МПа при комнатной температуре. Полученные прессовки спекали в вакууме 10^{-3} Па при температуре 1250 °С в течение 4 ч. Спеченные образцы с пористостью 2% имели предел прочности на растяжение 500–540 МПа и пластичность 26%.

Метод спекания порошков с использованием удаляемых порообразователей позволяет регулировать пористость, форму и размер пор, распределение пор по размерам, доли открытых и закрытых пор. В качестве порообразователей использовали органические (карбамиды, сахароза и другие соединения), неорганические (гидрокарбонат аммония, поваренная соль и другие

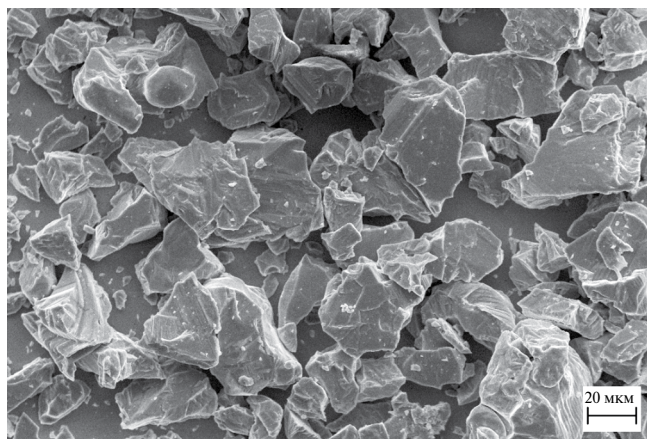


Рис. 1. СЭМ-изображение частиц гидрида титана.

соединения) и металлические соединения (магний, гидрид титана) [32, 33].

В работе [32] показано, что спеканием в вакууме при 1250 °С смеси титанового порошка со средним размером частиц 20 мкм и рисовой шелухи с размером частиц от 250 до 600 мкм можно получить титан с пористостью 24–35%. Массовое соотношение доли рисовой шелухи и титанового порошка в смеси составляло 1 : 5. Образцы прессовали при давлении 500 МПа. Прочность на сжатие спеченных образцов составила 440–938 МПа, пластичность – 15–17%.

В работе [33] исследовали влияние порообразователя KCl (со средним размером частиц 366 мкм) на пористость и прочность при сжатии спеченных при 1320 °С образцов из смеси порошков титана (со средним размером частиц 74.9 мкм) и порообразователя. Показано, что с ростом содержания порообразователя от 0 до 60 об. % объемная усадка спеченных образцов увеличивается от 21 до 36%, относительная плотность образцов – от 0.35 до 0.8.

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение влияния содержания порообразователя (бикарбоната аммония) в смеси с гидридом титана, температуры и газовой среды спекания на пористость и прочность титана, полученного методом порошковой металлургии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и оборудование. Гидрид титана синтезировали методом СВС-гидрирования титановой губки [1]. Использовали титановую губку марки ТГ-100 (ГОСТ 17746-96).

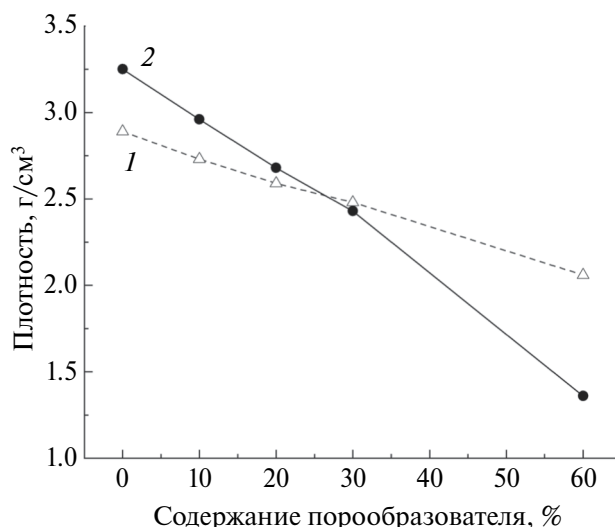


Рис. 2. Зависимости плотности прессовок (1) и образцов (2) после отжига при 800 °С от содержания порообразователя в шихте.

Размер частиц титановой губки составлял от 5 до 20 мм. Полученный гидрид титана TiH_2 подвергали последующему размолу и получали порошок с размером частиц менее 45 мкм чистотой 99.4 мас. %. Полученный порошок гидрида титана имел примеси (мас. %): С – 0.09; N – 0.17; O – 0.26; Fe – 0.03. Пикнометрическая плотность порошка гидрида титана составляла 3.80 ± 0.01 г/см³. На рис. 1 представлено изображение частиц порошка гидрида титана. Частицы порошка имеют оскольчатую форму.

Шихты состояли из смесей порошков бикарбоната аммония NH_4HCO_3 (ГОСТ 3762-78, плотность 1.58 г/см³), взятого в качестве временного порообразователя, и синтезированного нами гидрида титана TiH_2 . От бикарбоната аммония была взята фракция с размером частиц 200–315 мкм.

Разложение бикарбоната аммония происходит при низкой температуре, выделяются газовые продукты H_2O , NH_3 и CO_2 , которые не оказывают влияния на фазовый состав спеченных прессовок.

Смешение шихт выполняли в турбулентном смесителе С2.0. (Россия). Одноосное одностороннее прессование образцов проводили на гидравлическом прессе KNUTH HP15 фирмы Knuth (Германия) под давлением 300 МПа в разъемной цилиндрической матрице диаметром 13.6 мм. На засыпку брали около 10 г шихты.

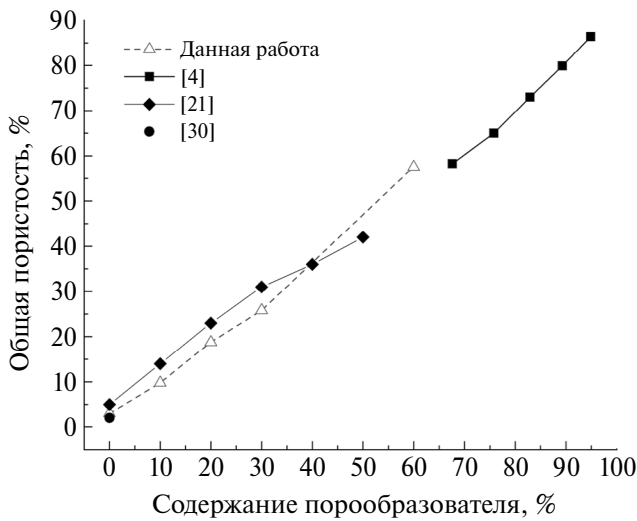


Рис. 3. Зависимости пористости образцов от содержания порообразователя.

Отжиг спрессованных заготовок для де-гидрирования гидрида титана и удаления порообразователя выполняли в печи GSL-1500X-40 (Китай).

Спекание образцов в вакууме выполнено в шахтной вакуумной электропечи

СШВ-1.2,5/25И1. Спекание в аргоне высокой чистоты (ТУ 6-21-12-94) проводили в печи GSL-1500X-40. Плотность, а также общую, открытую и закрытую пористости спеченных образцов определяли методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде (погрешность измерений плотности 0.01 г/см³).

Механические испытания на сжатие проводили на установке Instron 3382. Цилиндрические образцы имели диаметр 10 мм, высоту 20 мм.

Электронная микроскопия выполнена на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовление титановых образцов с разной пористостью. Титановые образцы с разной пористостью изготавливали методом порошковой металлургии. Для создания пористой структуры применялся временный порообразователь.

Таблица 1. Общая пористость (П) и прочность на сжатие(σ_b) пористых образцов титана

Условия спекания	В вакууме при 1150 °С	В вакууме при 1200 °С	В аргоне при 1150 °С	В аргоне при 1200 °С
П, % (0*)	3.0	3.0	12.6	7.9
σ_b , МПа (0*)	1407	1449	1117	1387
П, % (10*)	9,9	9,8	13,8	12,7
σ_b , МПа (10*)	1063	1146	795	980
П, % (20*)	17.6	15.8	19.3	19.4
σ_b , МПа (20*)	779	829	766	851
П, % (30*)	25.6	25.8	27.7	28.2
σ_b , МПа (30*)	496	493	570	567
П, % (60*)	59.3	57.6	59.0	56.1
σ_b , МПа (60*)	110	31	59	123

*Доля порообразователя, %.

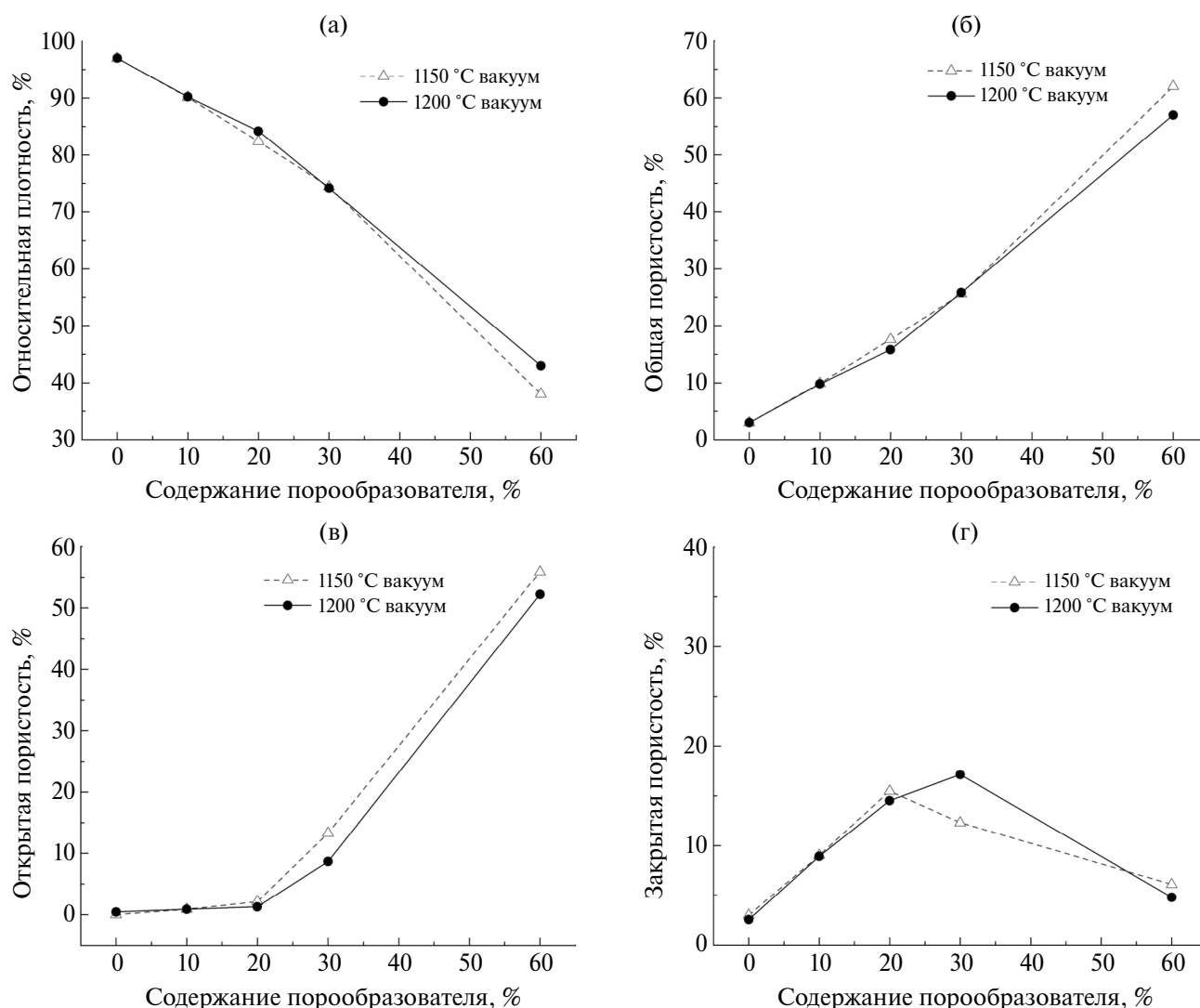


Рис. 4. Зависимости относительной плотности (а), общей (б), открытой (в), закрытой (г) пористости образцов, спеченных в вакууме, от содержания порообразователя в шихте.

Основными стадиями изготовления пористых образцов методом порошковой металлургии являлись: 1 — составление шихт из смеси порошка TiH_2 с порошком временного порообразователя; 2 — прессование заготовок; 3 — отжиг заготовок для удаления порообразователя и дегидрирования гидроксида титана; 4 — окончательное спекание. Для синтеза образцов с различными значениями пористости доля порообразователя в шихтах варьировалась от 0 до 60 об. %.

Спрессованные заготовки подвергали отжигу для удаления порообразователя NH_4HCO_3 и дегидрирования TiH_2 . Отжиг проводили в вакууме (остаточное давление около 10 Па) по режиму: нагрев до 100 °C за 50 мин, далее без выдержки нагрев до 800 °C за 30 мин, выдержка при этой температуре

120 мин, охлаждение с печью. В результате отжига в процессе нагрева до 100 °C происходило разложение порообразователя с выделением газообразных продуктов по реакции $\text{NH}_4\text{HCO}_3 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Дальнейший нагрев с выдержкой при 800 °C приводил к выделению водорода из гидроксида титана по реакции $\text{TiH}_2 \rightarrow \text{Ti} + \text{H}_2$ [34]. Таким образом получались слабо спеченные и потому непрочные пористые титановые заготовки, которые далее подвергались окончательному спеканию при более высокой температуре. На рис. 2 представлены зависимости плотности прессовок и образцов после отжига при 800 °C от содержания порообразователя.

Интересно отметить, что после отжига плотность заготовок с содержанием порообразователя до 30 об. % увеличивается,

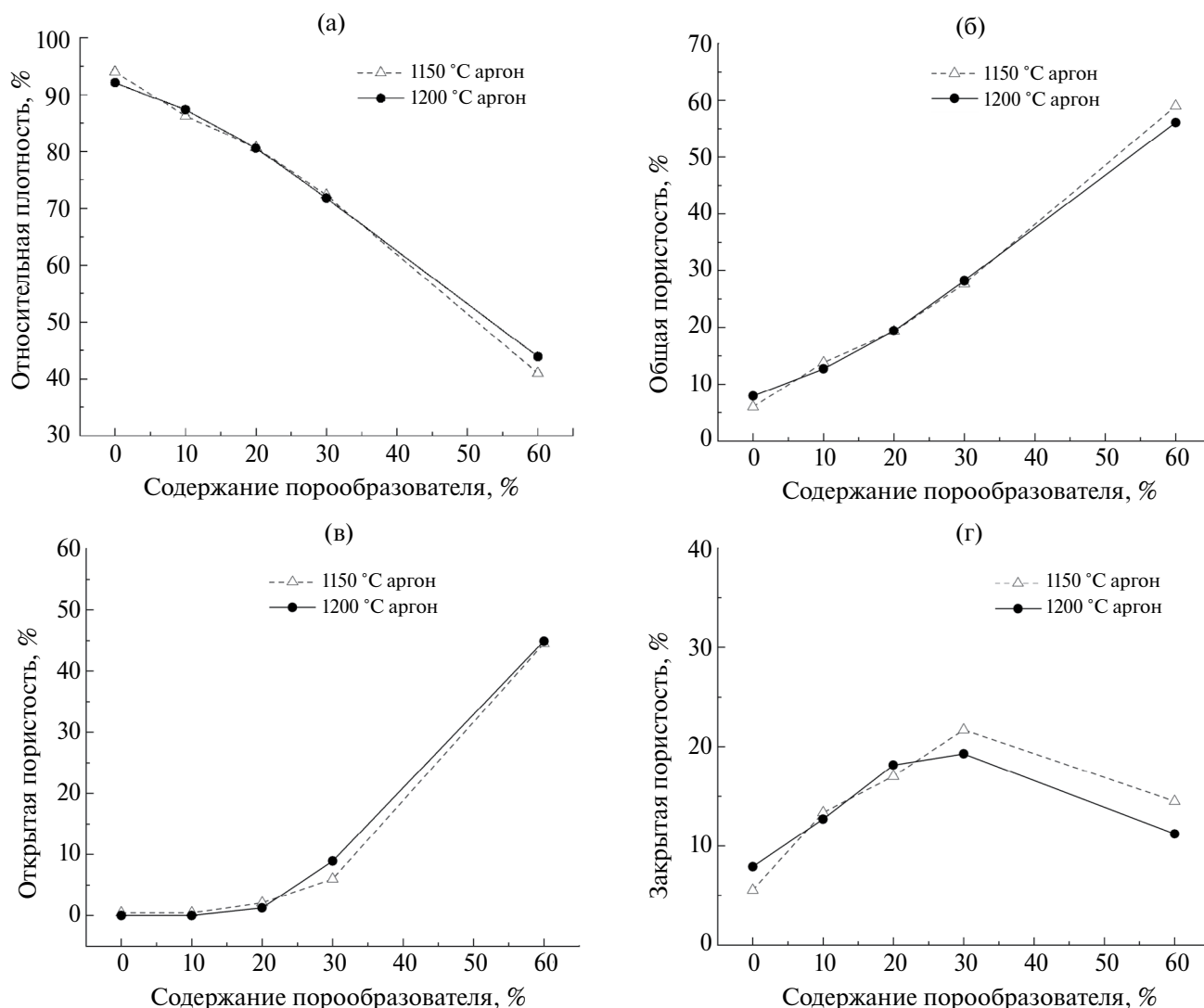


Рис. 5. Зависимости относительной плотности (а), общей (б), открытой (в), закрытой (г) пористости образцов, спеченных в аргоне, от содержания порообразователя в шихте.

тогда как при большем содержании порообразователя уменьшается. Видно, что графики плотностей прессовок и отожженных образцов пересекаются, что естественно. Очевидно, что плотность прессовки без порообразователя после отжига увеличивается благодаря переходу TiH_2 (3.75 г/см^3) в более плотный $\alpha\text{-Ti}$ (4.5 г/см^3) и частичному спеканию последнего. Прессовка с содержанием порообразователя 60 об. % дополнительно подвергается процессу выхода газов вследствие разложения порообразователя, который уменьшает массу образца. Последний процесс является определяющим, потому что относительная плотность такой прессовки уменьшилась на 33%. В точке пересечения графиков наблюдается баланс между процессами дегидрирования TiH_2 , спекания

и потери массы при разложении порообразователя, поэтому плотность в данной точке не изменяется.

Влияние содержания порообразователя на пористость отожженного образца показано на рис. 3. Пористость линейно возрастает с увеличением содержания порообразователя. Также видно, что пористость образца ниже объемной доли порообразователя. Это может быть вызвано объемной усадкой пористого титана во время спекания.

Для более глубокого спекания температуры 800°C явно недостаточно (температура плавления титана 1675°C). Заключительная стадия обработки образцов — окончательное спекание. В работе [30] для получения компактного титана из порошков гидрида

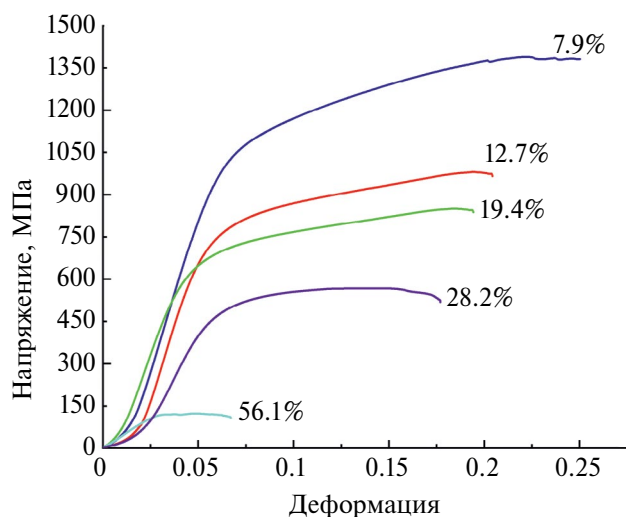


Рис. 6. Диаграммы сжатия образцов, спеченных в аргоне при 1200 °С, с разной плотностью.

титана спекание проводили при температуре 1250 °С. В настоящей работе стояла цель получить пористые материалы. Поэтому образцы спекали при более низких температурах — 1150 и 1200 °С. Использовали две среды спекания: вакуум и аргон. Режим спекания — нагрев до температуры спекания за 60 мин, выдержка в течение 150 мин, далее охлаждение с печью. Характеристики полученных образцов показаны на рис. 4 и 5. Представлены данные плотности, а также общей, открытой и закрытой пористости образцов, спеченных в разных атмосферах при температурах 1150 и 1200 °С, в зависимости от содержания порообразователя в шихте.

Из рис. 4 и 5 видно, что зависимости плотности и пористости от содержания порообразователя в шихте близки между собой и для температур спекания 1150 и 1200 °С. Это справедливо для спекания как в вакууме, так и в аргоне. Однако при спекании в аргоне получается материал с меньшей плотностью, особенно в области малых величин пористости. Это отчетливо видно из данных табл. 1. Вызывает интерес зависимость закрытой пористости образцов, спеченных и в вакууме, и в аргоне, от содержания порообразователя в шихте: рост до максимума при содержании порообразователя около 30%. При этом открытая пористость близких к нулю. При больших значениях содержания порообразователя — наоборот: закрытая пористость уменьшается, а открытая начинает резко возрастать.

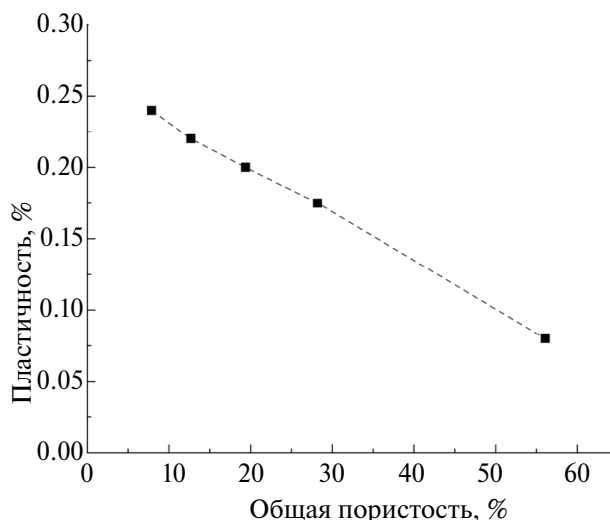


Рис. 7. Зависимость пластичности от общей пористости образцов, спеченных в аргоне при 1200 °С.

Причина этого явления в том, что при малом количестве порообразователя его частицы в прессовке оказываются изолированными друг от друга и почти вся пористость после спекания оказывается закрытой. А когда порообразователя в прессовке много, он создает непрерывную структуру и после спекания большая часть пор оказывается взаимосвязанной, а изолированных пор становится меньше.

Прочность титановых образцов с разной пористостью. Были проведены испытания на сжатие для всех изготовленных пористых образцов. Данные о пределе прочности на сжатие в зависимости от пористости и среды спекания представлены в табл. 1 для всех режимов спекания. Там же приведены данные по общей пористости.

На рис. 6 приведены диаграммы деформирования образцов с разной пористостью, спеченных при 1200 °С в аргоне. Видно, что предел прочности на сжатие уменьшается на порядок при увеличении пористости от 7.9 до 56.1%. Сильно уменьшается пластичность (рис. 7), причем очевидно, что она связана с пористостью линейным законом.

Для образцов, спеченных при температуре 1150 °С в аргоне, диаграммы сжатия похожи. То же можно сказать об образцах, спеченных в вакууме независимо от температуры спекания. На рис. 8 представлены графические зависимости предела прочности на сжатие от пористости для образцов, спеченных в вакууме и аргоне.

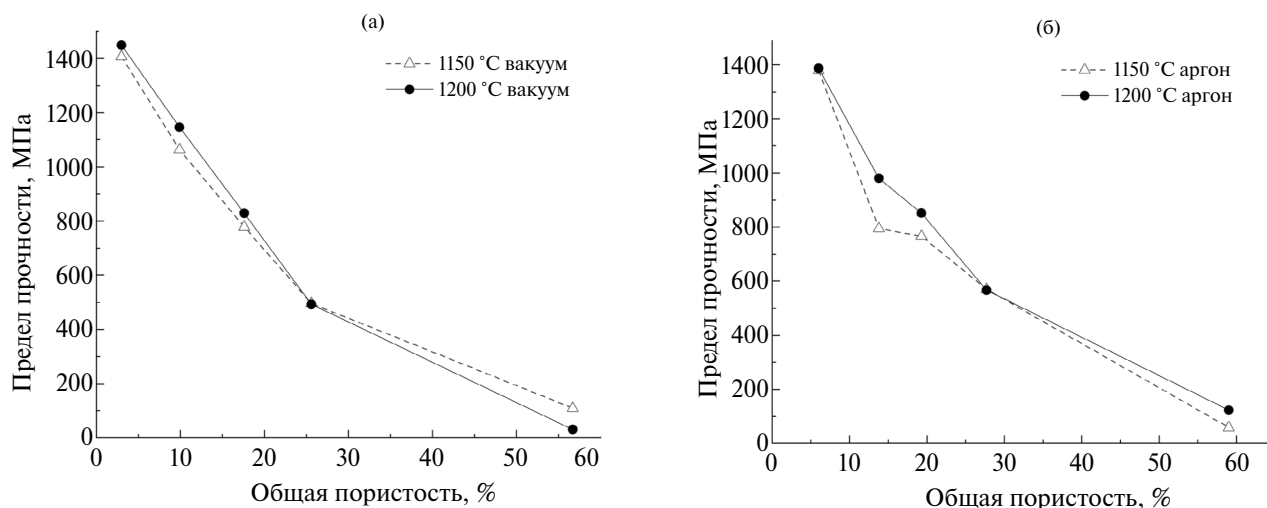


Рис. 8. Зависимости предела прочности на сжатие от общей пористости: а – спекание в вакууме; б – спекание в аргоне.

Анализ данных табл. 1 и рис. 6–8 показывает, что среда спекания и изменение температуры спекания на 50 °С не сильно влияют на характеристики прочности при сжатии. Изменения в основном можно оценить величиной в 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены режимы спекания для изготовления образцов титана с высокой пористостью методом порошковой металлургии с использованием в качестве порообразователя бикарбоната аммония NH_4HCO_3 . Достигнута величина пористости более 59%. Продemonстрировано, что увеличение содержания порообразователя в исходной смеси от 0 до 60% увеличивает пористость на порядок. Установлено, что пористость образцов без порообразователя, спеченных в вакууме и в аргоне, различна. Для образцов, спеченных в вакууме, пористость составляет 3%. Образцы, спеченные в аргоне, имеют пористость 7.9–12.6%. Для образцов с 60% порообразователя, спеченных в вакууме и аргоне, пористость практически одинакова и варьируется в диапазоне 56.1–59.3%.

Показано, что прочность пористых образцов зависит от среды и температуры спекания. Прочность образцов при спекании в вакууме, как правило, выше и может достигать 1450 МПа. Изменение температуры спекания от 1150 до 1200 °С не сильно влияет на характеристики прочности пористых образцов при сжатии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00126).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черезов Н.П., Алымов М.И.* Структура и свойства порошка гидрида титана, полученного из титановой губки методом СВС-гидрирования // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022. Т. 16. № 4. С. 15–24.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2022-4-15-24>
2. *Froes F.H.* Titanium Powder Metallurgy: A Review. Part 1 // Adv. Mater. Res. 2012. V. 9. P. 16–22.
3. *Khalloufi M. El, Drevelle O., Soucy G.* Titanium: An Overview of Resources and Production Methods // Minerals. 2021. V. 11. P. 1425.
<https://doi.org/10.3390/min11121425>
4. *Wang J., Liu A., Ao Q., Wu C., Ma J., Cao P.* Energy Absorption Characteristics and Preparation of Porous Titanium with High Porosity // Mater. Today Commun. 2023. V. 34. P. 105003.
<https://doi.org/10.1016Xj.mtcomm.2022.105003>
5. *Кутенов А. Л.* Наноструктурированные титановые мембраны в водоподготовке и водо-

- очистке // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2018. Т. 6. № 126. С. 40–43.
6. *Алымов М.И., Евстратов Е.В., Анкудинов А.Б., Зеленский В.А., Голосова О.А., Колобова А.Ю.* Получение, структура и свойства пористых материалов на основе титана // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 6. С. 70–75.
 7. *Friederici V., Hartwig T.* Metal Injection Moulding of Titanium Medical Components // Key Eng. Mater. 2016. V. 704. P. 155–160.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.704.155>
 8. *Zeng Sh., Liu G., He W., Wang J., Ye J., Sun C.* Design and Performance Prediction of Selective Laser Melted Porous Structure for Femoral Stem // Mater. Today Commun. 2023. V. 34. P. 104987.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104987>
 9. *Castillo S.M., Munoz S., Trueba P., Diaz E., Torres Y.* Influence of the Compaction Pressure and Sintering Temperature on the Mechanical Properties of Porous Titanium for Biomedical Applications // Metals. 2019. V. 9. P. 1249.
<https://doi.org/10.3390/met9121249>
 10. *Annur D., Kartika I., Sudiro T., Supriadi S., Suharno B.* Microstructure, Mechanical Properties, and In Vitro Studies of Porous Titanium Obtained by Spark Plasma Sintering // Trans. Indian Inst. Met. 2022. V. 75. № 12. P. 3067–3076.
<https://doi.org/10.1007/s12666-022-02680-9>
 - Королевский Н.Л., Петров В.С., Полунина А.А., Гайдар А.И., Столяров В.Л., Васильевский В.В., Монахов И.С., Ключева Н.Е.* Композитный материал на основе пористого титана для селективного поглощения водорода из газовых смесей // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 2. С. 9–16.
 11. *Yu C., Cao P., Jones M.I.* Titanium Powder Sintering in a Graphite Furnace and Mechanical Properties of Sintered Parts // Metals. 2017. V. 7. № 67.
<https://doi.org/10.3390/met7020067>
 12. *Белявин К.Е., Минько Д.В., Решетников Н.В., Дьячкова Л.Н.* Сравнительные исследования микроструктуры и прочности пористых материалов из порошка титана, полученных спеканием в вакууме и методом электроконтактного нагрева в защитной атмосфере // Литье и металлургия. 2010. Т. 4. № 58. С. 122–127.
 13. *Oak J.-J., Bang J.I., Bae K.-C., Kim Y.H., Lee Y.-C., Chun H.H., Park Y.H.* Characterization of the Graded Microstructure in Powder Sintered Porous Titanium // Arch. Metall. Mater. 2015. V. 60. № 2. P. 1265–1269.
<https://doi.org/10.1515/biolog-2015-0111>
 14. *Chen W., Yamamoto Y., Peter W.H.* Investigation of Pressing and Sintering Processes of CP-Ti Powder Made by Armstrong Process // Key Eng. Mater. 2010. V. 436. P. 123–130.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.436.123>
 15. *Suzuki A., Kikuchi K., Nakano K., Kitagawa H.* Low-Temperature Densification of Titanium Powder by Pulse-Current Sintering under Cyclic Uniaxial Pressure // J. Jpn. Soc. Powder Metall. 2020. V. 67. P. 525–528.
<https://doi.org/10.2497/jjspm.67.525>
 16. *Luo S.D., Liu B., Tian J., Qian M.* Sintering of Titanium in Argon and Vacuum: Pore Evolution and Mechanical Properties // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2020. V. 90. P. 105226.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105226>
 17. *Robertson M., Schaffer G.B.* Refinement of Master Densification Curves for Sintering of Titanium // Metall. Mater. Trans. A. 2020. V. 41. P. 2010–2949.
<https://doi.org/10.1007/s11661-010-0290-7>
 18. *Kaseb I., Moazami-Goudarzi M., Abbasi A. R.* Effect of Particle Size on the Compressibility and Sintering of Titanium Powders // Iranian J. Mater. Forming. 2019. V.6 № 2. P. 42–51.
 19. *Sanchez-Herencia A.J., Gonzalez Z., Rodriguez A., Molero E., Ferrari B.* Operational Variables on the Processing of Porous Titanium Bodies by Gelation of Slurries with an Expansive Porogen // Materials. 2021. V. 14. P. 4744.
<https://doi.org/10.3390/ma14164744>
 20. *Erk K.A., Dunand D.C., Shull K.R.* Titanium with Controllable Pore Fractions by Thermoreversible Gelcasting of TiH₂ // Acta Mater. 2008. V. 56. P. 5147–5157.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.06.035>
 21. *Ahmad S., Muhamad N., Muchtar A., Sahari J., Jamaludin K.R., Ibrahim M.H.I., Mohamad N.H., Murtadhahadi I.* Producing of Titanium Foam Using Titanium Alloy (Al₃Ti) by Slurry

- Method // Brunei Int. Conf. of Eng. and Technol. (BICET). 2008.
22. Jung J.H., Park H.K., Lee B.S., Choi J., Seo B., Kim H.K., Kim G.H., Kim H.G. Study on Surface Shape Control of Pure Ti Fabricated by Electron Beam Melting Using Electrolytic Polishing // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 324. P. 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.061>
 23. Ataee A., Li Y.C., Fraser D., Song G.S., Wen C.E. Anisotropic Ti-6Al-4V Gyroid Scaffolds Manufactured by Electron Beam Melting (EBM) for Bone Implant Applications // Mater. Des. 2018. V. 137. P. 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.040>
 24. Takata N., Uematsu K., Kobashi M. Compressive Properties of Porous Ti-Al Alloys Fabricated by Reaction Synthesis Using a Space Holder Powder // Mater. Sci. Eng. A. 2019. V. 697. P. 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.015>
 25. Lei X.J., Xu B.Q., Yang G.B., Shi T.T., Liu D.C., Yang B. Direct Calciothermic Reduction of Porous Calcium Titanate to Porous Titanium // Mater. Sci. Eng. C. 2018. V. 91. P. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.027>
 26. Материалообразующие высокоэкзотермические процессы: металлотермия и горение систем термитного типа / Под ред. Алымова М.И. М.: РАН, 2021. 376 с. ISBN 978-5-907366-46-6
 27. Zhao G.Y., Zhang L., Niu Y.N., Sun K.N. A Molten Mg Corrosion Method for Preparing Porous Ti Foams Self-Supported Li-O₂ Battery Cathodes // Electrochim. Acta. 2017. V. 224 P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.033>
 28. Jiao X.Y., Feng P.Z., Wang J.Z., Ren X.R., Akhtar F. Exothermic Behavior and Thermodynamic Analysis for the Formation of Porous TiAl₃ Intermetallics Sintering with Different Heating Rates // J. Alloys Compd. 2019. V. 811. P. 152056. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152056>
 29. Dekhtyar A. I., Ivasishin O. M., Moiseeva I. V., Prokudina V. K., Savvakina D. G., Sychev A. E. The Mechanical Properties of Compact Titanium Produced from Titanium Hydride Powders Using Self-Propagating High-Temperature Synthesis // Powder Metall. Met. Ceram. 2015. V. 53. № 9–10. P. 71–81. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-015-9649-z>
 30. Баглюк М.А., Ивасишин О.М., Стасюк О. О., Саввакин Д. Г. Влияние компонентного состава шихты на структуру и свойства спеченных титана матричных композитов с высокомолекулярными соединениями // Спеченные металлы и сплавы. 2017. № 1/2. С. 59–68.
 31. Wang X.S., Lu Z.L., Jia L., Chen J.X. Preparation of Porous Titanium Materials by Powder Sintering Process and Use of Space Holder Technique // J. Iron Steel Res. Int. 2017. V. 24. P. 97–102. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(17\)30014-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(17)30014-6)
 32. Xiao J., Qiu G.B. Research Review of Space Holders of Sintered Titanium Foams with Large Pores and High Porosity // Mater. China. 2018. V. 37. P. 372–378. <https://doi.org/10.7502/j.issn.1674-3962.2018.05.07>
 33. Черезов Н. П., Алымов М. И., Загоржевский В. В. Исследование порошка титана, полученного методом СВС-гидрирования и дегидрирования в вакуумной печи // Перспективные материалы. 2022. № 3. С. 70–77. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-3-70-77>