

УДК 621.762.4.045, 621.762.52

## Механические и тепловые свойства титан-алюминиевого композиционного материала, полученного холодным прессованием и твердофазным спеканием

Н. А. Панькин, М. А. Окин, Н. И. Чистяков, А. Ф. Сигачев, А. С. Луконькина

*Изучены механические и тепловые свойства (Ti, Al)-композита, полученного холодным прессованием смеси порошков титана и алюминия с последующим твердофазным спеканием на воздухе. Получены зависимости плотности, твердости, коэффициентов теплового расширения и температуропроводности от содержания титана и давления прессования. Их значения определяются свойствами исходных компонентов (алюминия, титана), наличием порового пространства и процессами, протекающими при твердофазном спекании.*

PACS: 62.20.mt, 65.40.De, 65.90.+i

*Ключевые слова:* композит, формование, твердофазное спекание, плотность, твердость, линейный коэффициент термического расширения, температуропроводность.

### Введение

В настоящее время различные отрасли промышленности нуждаются в материалах с набором уникальных физико-механических, химических и эксплуатационных характеристик. Использование однокомпонентных веществ (чистых металлов, интерметаллоидов и т.д.) не позволяет в полном объеме удовлетворить данный запрос. Например, созрела необходимость создания материалов с высокими значениями теплопроводности, электропроводности и низким коэффициентом термического расширения для приборов силовой электроники. В последнее время для решения подобных задач применяют композиционные материалы (металломатричные, полимерные и т.д.), которые сочетают в себе полезные свойства каждого из входящих в них компонентов.

Основным этапом большинства методов получения композитов является термическая обра-

ботка при высоких температурах, что требует значительных энергетических затрат и применения дорогостоящего оборудования. При этом получают материалы однородные по элементному и фазовому составу. В ряде случаев неоднородность не является существенным препятствием для последующего их практического использования. Среди подобных материалов можно назвать системы титан-алюминий [1—4], которые широко применяются при создании композиционных катодов для генерирования многокомпонентной плазмы [4]. Одним из методов их создания — прессование порошковых смесей с последующим спеканием [5]. Получение данного материала на цельнолитой основе позволяет смягчить требование к его пористости.

Цель настоящей работы — исследование влияния содержания титана и давления прессования на плотность, твердость, коэффициенты термического расширения и температуропроводности (Ti, Al)-материалов, полученных прессованием смеси порошков титана и алюминия и последующим твердофазным спеканием на воздухе. Данная работа является продолжением проводимых нами исследований вышеуказанных титан-алюминиевых композитов [6, 7].

### Методика эксперимента

Для получения композитов в качестве исходного материала использовали порошки титана

---

Панькин Николай Александрович, доцент.  
Окин Максим Александрович, доцент.  
Чистяков Николай Иванович, ведущий инженер.  
Сигачев Александр Федорович, ведущий инженер.  
Луконькина Анна Сергеевна, магистрант.  
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева.  
Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск,  
ул. Большевикская, 68.  
Тел. +7 (8342) 29-05-97. E-mail: panjkinna@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2016 г.

---

© Панькин Н. А., Окин М. А., Чистяков Н. И., Сигачев А. Ф., Луконькина А. С., 2016

(марки ПТМ-1) и алюминия (марки ПА-4). Их механическое смешивание (с возможной механоактивацией) осуществляли на планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 5 в течение 15 минут при соотношении масс порошка и размольных тел 1:10 и частоте вращения барабана 200 об/мин. Прессование порошков в образцы цилиндрической формы проводили на машине для механических испытаний Shimadzu AG-X100kN при комнатной температуре в течение 5 минут. Длительность формования превышала соответствующее время достижения постоянства линейных размеров вдоль оси приложения нагрузки. На завершающем этапе проводили твердофазное спекание на воздухе при температуре 600 °С.

При проведении экспериментов и последующей обработке их результатов использовали центральное ортогональное композиционное планирование второго порядка. Рассматривалось влияние трех факторов: содержание титана  $C_{Ti}$  (от 57 до 93 ат.%), нагрузку прессования  $F$  (от 24 до 97 кН, соответствующее давление от 185 до 780 МПа) и время спекания  $t$  (от 47 до 193 мин).

Измерение твердости (по Бринеллю) проводили с помощью твердомера DuraVision. Коэффициент линейного термического расширения (КТР) при комнатной температуре определяли на установке термомеханического анализа TMA/SDTA-840. Коэффициент температуропроводности определяли нестационарным методом лазерной вспышки на установке LFA-427/7/G. Плотность (Ti, Al)-композитов определяли гидростатическим взвешиванием на аналитических весах XS-204.

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что плотность  $\rho$  исследуемого (Ti, Al)-материала растет по мере увеличения нагрузки прессования и доли титана. Наибольшее её значение соответствует максимальному содержанию титана и давлению прессования, а наименьшее — минимальным  $C_{Ti}$  и  $F$  соответственно. Сопоставление результатов эксперимента с данными расчета плотности для беспористого материала указывает на относительно большую пористость композиционного материала (10—21 %) [6]. Рост концентрации титана (при фиксированной  $F$ ) приводит к увеличению  $\rho$ . Влияние состава композита на его плотность обусловлено различием в свойствах исходных компонентов — алюминия (~2,5 г/см<sup>3</sup>) и титана (~4,5 г/см<sup>3</sup>). Увеличение нагрузки (при фиксированной  $C_{Ti}$ ) также сопровождается возрастанием плотности (Ti, Al)-композита. Это связано с тем, что рост давления прессования приводит к более

полному заполнению порового пространства вследствие достаточно хорошей пластичности алюминия, т.к. давление прессования многократно превышало его пределы прочности и пластичности.

Результаты измерения твердости по Бринеллю  $H_B$  указаны на рис. 1. Отмечается, что результирующая твердость не определяется лишь суперпозицией соответствующих вкладов алюминия и титана. На это указывает наличие локального максимума зависимости  $H_B$  от содержания титана в (Ti, Al)-композите, который при росте давления прессования сдвигается в область больших значений  $C_{Ti}$  (от ~75 до 85 ат.%).

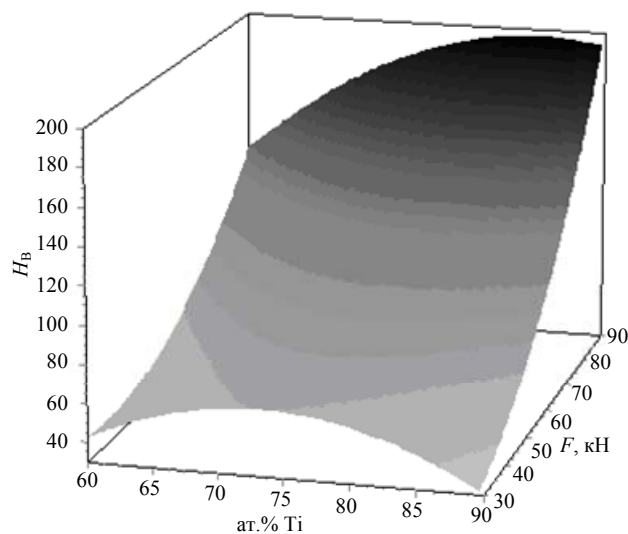


Рис. 1. Зависимость твердости по Бринеллю  $H_B$  (Ti, Al)-композиционного материала от содержания титана и нагрузки прессования (время спекания 180 мин).

Отмечается некоторое (~10 %) снижение твердости при увеличении времени твердофазного спекания на воздухе. Данный факт связан с рекристаллизационными процессами в компонентах композита при изотермической выдержке. Причем более интенсивно они протекают в алюминии. На это также указывают данные рентгенографического исследования. Положение дифракционных линий от алюминия практически совпадает с положением соответствующих рефлексов порошкового материала. Проводимая термическая обработка приводит к полному снятию внутренних напряжений в алюминии. Для титана смещения линий (относительно порошкового материала) достаточно большие. Данный факт обусловлен тем, что используемая в эксперименте температура спекания близка к температуре плавления алюминия.

Ранее нами проведенные рентгенографические исследования (Ti, Al)-композитов выявили присутствие фазы интерметаллоида  $TiAl_3$  [6, 7]. Они показали, что увеличение времени спекания, давления прессования, а также концентрации

алюминия приводит к возрастанию содержания  $TiAl_3$  [6]. Кроме того, на поверхности образцов, а также и на границах зерен неизменно присутствуют оксиды титана и алюминия (из-за большого сродства к кислороду). По прочностным характеристикам интерметаллоид  $TiAl_3$  и оксиды металлов, входящих в композит, превосходят титан и алюминий. И, как следствие, их наличие приводит к росту результирующей твердости (Ti, Al)-композитов.

Испытания методом одноосного сжатия вдоль оси прессования (без экстензометра) показали, что композиты, полученные при  $F > 60$  кН, выдерживают (без образования трещин и прочих следов разрушения) максимальную нагрузку 100 кН (предел машины Shimadzu AG-X100kN). Давление, соответствующее данной нагрузке, сопоставимо с пределом текучести титана. Образцы с содержанием титана более 60 ат.% Ti, полученные при  $F \leq 60$  кН, при испытаниях полностью разрушались. Нагрузка в данном случае была сравнима или несколько больше усилия при формовании  $F$  ( $\pm 10\%$ ). При этом, увеличение содержания алюминия в композите (при нагрузке  $\leq 60$  кН) приводило к увеличению устойчивости к внешнему механическому воздействию (наблюдались очаги разрушения по краям цилиндрических образцов).

Результаты измерения термического коэффициента расширения (ТКР) при комнатной температуре представлены на рис. 2. Наибольшие значения ТКР принимает при максимальном давлении прессования и минимальном содержании титана, а наименьшие — при максимальных нагрузке и  $C_{Ti}$ . Увеличение доли титана в композиционном материале уменьшает коэффициент термического расширения (Ti, Al)-композита. При этом наибольшие изменения ТКР отмечаются при более высоком давлении прессования. Повышение нагрузки, прикладываемой в процессе формования, при малом  $C_{Ti}$  сопровождается ростом ТКР ( $\sim 20\%$ ), а при большой доли титана в материале — к его снижению ( $\sim 8\%$ ). Увеличение времени твердофазного спекания приводит к увеличению ТКР ( $\sim 10\%$ ). Влияние состава на коэффициент термического расширения обусловлено значениями КТР для исходных элементов композиционного материала — титана (при  $T = 300$  К —  $8,4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) и алюминия (при  $T = 300$  К —  $22,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) [8]. ТКР для некоторых сочетаний варьируемых факторов (в основном при малых временах термообработки) получился ниже соответствующих значений ТКР компонент композита. Данный факт обусловлен наличием значительного порового пространства в композиционном материале.

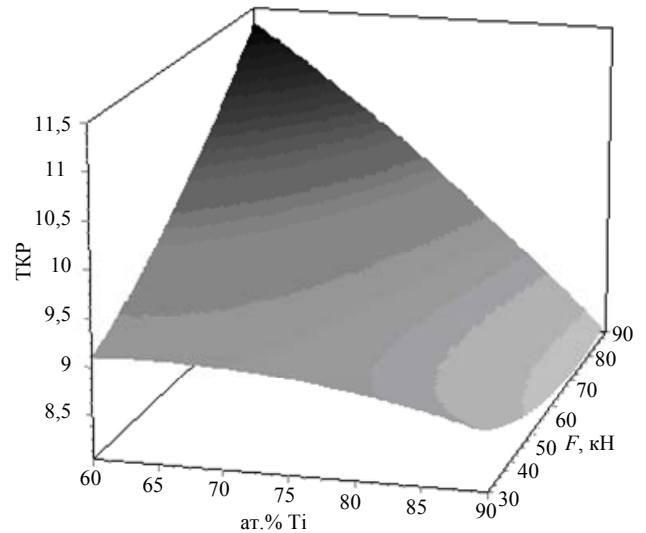


Рис. 2. Зависимость линейного коэффициента термического расширения (ТКР,  $10^{-6} K^{-1}$ ) титан-алюминиевого композита от содержания титана и нагрузки при формовании (время спекания 180 мин).

Экспериментальные значения коэффициента температуропроводности  $a$  представлены на рис. 3. Его величина имеет наибольшие значения при минимальной концентрации титана и максимальном давлении прессования, а наименьшие — при минимальных содержании титана и нагрузке прессования. Отмечается повышение значений температуропроводности с увеличением  $F$ . Причем при малых  $C_{Ti}$  скорость роста значительно выше ( $\Delta a = 2,5 \cdot 10^{-6} m^2/c$  при 60 ат.% Ti и  $1,5 \cdot 10^{-6} m^2/c$  при 90 ат.% Ti).

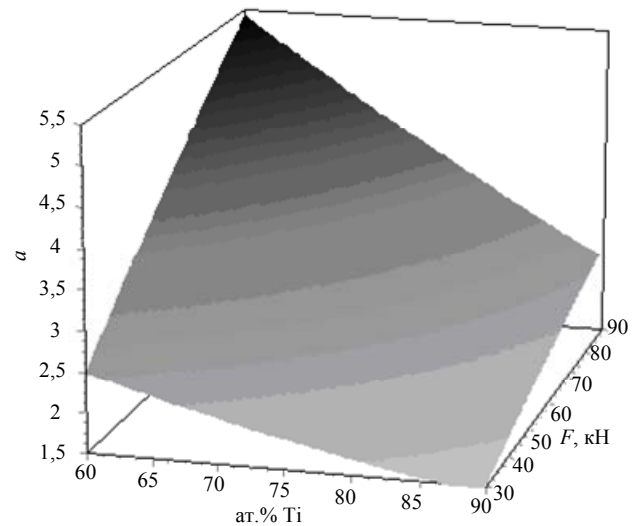


Рис. 3. Зависимость коэффициента температуропроводности ( $a$ ,  $10^{-6} m^2/c$ ) композиционного (Ti, Al)-материала от содержания титана и нагрузки прессования (время спекания 180 мин).

Увеличение содержания титана в композите сопровождается уменьшением коэффициента температуропроводности. Причем при больших на-

грузках прессования снижение его значений происходит заметно быстрее. Такое поведение температуропроводности композита обусловлено суперпозицией соответствующих вкладов от титана ( $9,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) и алюминия ( $93,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ). Конечные значения коэффициента температуропроводности определяются также и пористостью, т.к. наибольшие его значения меньше или сравнимо с соответствующими значениями для титана, несмотря на наличие алюминия. Причем изменения  $a$  при росте содержания титана не коррелируют с поведением пористости — наибольший вклад вносит исходные значения коэффициента температуропроводности компонентов композита. Например, при нагрузке прессования при росте  $S_{Ti}$   $a$  изменяется на 40 % и на 55 %, а пористость на 50 % и на 45 % при значениях  $F$  30 и 90 кН соответственно.

### Заключение

В работе комплексно изучены механические и тепловые свойства (Ti, Al)-композита, полученного холодным прессованием смеси порошков титана и алюминия с последующим твердофазным спеканием на воздухе.

Значения плотности, твердости, коэффициентов термического расширения и температуропроводности обусловлены свойствами исходных компонентов исследуемых (Ti, Al)-композитов (алюминия и титана), наличием порового пространства и процессами, протекающими при твердофазном спекании.

Экстремальные значения (минимальные и максимальные) вышеуказанных свойств (исключение — твердость по Бринеллю) соответствуют сочетаниям крайних значений варьируемых факторов — содержания титана и нагрузки прессования. Плотность композиционного материала максимальна при наибольших содержании титана и давлении прессования, а минимальна — при их

минимальной величине. Термический коэффициент линейного расширения принимает наибольшие значения при максимальном давлении прессования и минимальном содержании титана, а наименьшие — при максимальных нагрузке и доли титана в (Ti, Al)-композите. Коэффициент температуропроводности максимален при минимальной концентрации титана и максимальном давлении прессования, а наименьшие — при минимальных содержании титана и нагрузке прессования.

Отмечается наличие локального максимума на зависимости твердости по Бринеллю от содержания титана в (Ti, Al)-композите. Рост давления прессования приводит к его сдвигу в область больших значений концентраций титана.

Результаты данной работы могут быть использованы при оптимизации режимов формования и твердофазного спекания композитов системы Ti-Al с целью создания титан-алюминиевых материалов с заданными параметрами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пачин С. А., Бурков А. А., Комарова В. С. // Поверхность. 2013. № 6. С. 16.
2. Курзина И. А., Козлов Э. В., Попова Н. А., Калашиников М. П., Никоненко Е. Л., Савкин К. П., Окс Е. М., Шаркев Ю. П. // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 11. С. 1384.
3. Прибытков Г. А., Андреева И. А., Коржова В. В. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 18.
4. Амосов А. П., Латухин Е. И., Федотов А. Ф., Ермошкин А. А., Алтухов С. И. // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 1. С. 46.
5. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формирование и спекание. — М.: МИСИС, 2002.
6. Панькин Н. А., Сигачев А. Ф., Мишкин В. П. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 30.
7. Панькин Н. А., Сигачев А. Ф., Носов Ю. С., Окин М. А., Юдин В. А. // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия». 2015. № 1. С. 27.
8. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989.

## Mechanical and thermal properties of the aluminum-titanium composite material obtained by cold pressing and sintering the solid phase

*N. A. Pan'kin, M. A. Okin, N. I. Chistyakov, A. F. Sigachev, A. S. Lukon'kina*

Ogarev Mordovia State University  
68 Bolshevistskaya str., Republic of Mordovia, Saransk, 430005, Russia  
E-mail: panjkinna@yandex.ru

*Received June 23, 2016*

***Consideration is given to investigation of physical, and thermal properties of (Ti, Al)-aggregate made by compressing the mixture of titanium and aluminum powders, followed by solid phase sintering in air. It are obtained the dependences of the density, hardness, coefficient of thermal expansion and thermal conductivity of the composition, pressure and pressing time in the sintering heat treatment. Their values are determined by the properties of the starting components (aluminum, titanium), the presence of the pore space and the processes occurring in solid-phase sintering.***

PACS: 62.20.mt, 65.40.De, 65.90.+i

*Keywords:* composite, solid-phase sintering, density, hardness, coefficient of linear thermal expansion, thermal diffusivity.

### REFERENCES

1. S. A. Pachin, A. A. Burkov, and V. S. Komarova, Surf. X-ray. Invest., No. 6, 16 (2013).
2. B. A. Kurzina, E. V. Kozlov, N. A. Popova, et al., Bull. RAS. Ser. Phys. **76**, 1384 (2012).
3. G. A. Pribytkov, I. A. Andreeva, and V. V. Korzhova, Fizik. Khim. Obrab. Material., No. 1, 18 (2011).
4. A. P. Amosov, E. I. Latukyin, A. F. Fedotov, et al., Izv. Vuzov. Ser. Poroshk. Metallurg., No. 1, 46 (2011).
5. G. A. Libenson, V. Yu. Lopatin, and G. V. Komarnitskii, *Processes of Dust Metallurgy. Vol. 2.* (MISIS, Moscow, 2002) [in Russian].
6. N. A. Pankin, A. F. Sigachev, and V. P. Mishkin, Prikl. Fiz., № 6, 30 (2015).
7. N. A. Pankin, A. F. Sigachev, Yu. S. Nosov, et al., Izv. Vuzov. Ser. Poroshk. Metallurg., No. 1, 27 (2015).
8. V. E. Zinov'ev, *Thermal Properties of Metals at High Temperatures.* (Metallurgiya, Moscow, 1989) [in Russian].