

УДК 621.746

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-64-68

*А.И. Ковтунов<sup>1</sup>, Ю.Ю. Хохлов<sup>1</sup>, С.В. Мямин<sup>1</sup>***ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ**

*Предложена жидкофазная технология формирования композиционных пеноматериалов: пеноалюминий–титан, пеноалюминий–железо, пеноалюминий–никель. Проведены испытания прочности сцепления слоев пенокомпозита, прочности при сжатии и плотности материала.*

**Ключевые слова:** *пеноалюминий, композиционный материал, алюминиевый расплав, флюс, гранулы.*

*A liquid-phase technology formation of foamed aluminum-titanium, foamed aluminum-iron, and foamed aluminum-nickel composite materials has been offered. Tests of bonding strength of foamed composite layers, compression strength and material density have been done.*

**Keywords:** *foamed aluminum, composite material, aluminum melt, flux, granules.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет» [Togliatti State University] E-mail: office@tltsu.ru

**Введение**

Пеноалюминий обладает рядом уникальных свойств, благодаря которым находит применение в промышленности. Однако механические свойства пеноалюминия из-за повышенной пористости остаются невысокими. Для повышения механических свойств изделий из пеноалюминия предложено применять композиционный материал – пеноалюминий–титан [1]. Для производства композиционных материалов осуществляли совместную прокатку титана и пеноалюминия. Механические свойства таких материалов повышались в несколько раз. Прочность при изгибе составляла >50 МПа при сравнительно низкой плотности – на уровне 0,7 г/см<sup>3</sup> [1]. Недостатком этой технологии является высокая трудоемкость процесса, что ограничивает перспективы применения предложенных композиционных материалов.

**Материалы и методы**

С учетом проводимых работ по исследованию процессов производства пеноалюминия фильтрацией через водорастворимые соли [2–4] предложено формировать композиционные слоистые материалы непосредственно при литье пеноалюминия. При этом сплошной армирующий материал предварительно устанавливается в форму перед заполнением водорастворимых гранул (рис. 1). В качестве армирующего материала может использоваться не только титан, но и другие конструкционные металлические материалы.

Исследования процессов жидкофазного формирования пенокомпозитов и их свойств проводили с применением листовой арматуры из титана, никеля и стали в условиях Тольяттинского государственного университета. Листы предварительно подвергали травлению, покрывали их поверхность флюсом на основе эвтектической системы KF–AlF<sub>3</sub>, который обеспечивает хорошее смачи-

вание титана, никеля и стали алюминием [5–7]. Алюминирование листов проводили окунанием в алюминиевый расплав при температуре 700–750°C. Перед установкой листов в форму их поверхность покрывали флюсом той же системы.

Для литья пенокомпозита использовали металлическую форму с нижним подводом металла и с размером рабочей полости под отливку 100×100×20 мм. Температура заливки формы сплавом марки АК12 составляла 800–820°C. Температуру формы с гранулами из хлорида натрия при заливке устанавливали на уровне 500°C.

Прочность сцепления слоев композита определялась на специально изготовленных образцах при отрыве (рис. 2, а); испытания при сжатии проводили для образцов из пеноалюминия и композиционного материала (рис. 2, б).

Химический состав переходного слоя композиционных материалов определяли на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (фирма ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

**Результаты и обсуждение**

Проведенные исследования подтвердили возможность формирования пенокомпозитов жидкофазным способом (рис. 3). Слои пеноалюминия отличались равномерной пористостью с размером пор, соответствующим размеру применяемых гранул.

Принятая схема подготовки поверхности листового материала обеспечила адгезионную связь армирующего материала и пеноалюминия. Прочность сцепления слоев в зависимости от применяемого металлического листа составляла не менее 1,8–11 МПа. Разрушение всех образцов происходило по переходному интерметаллидному слою

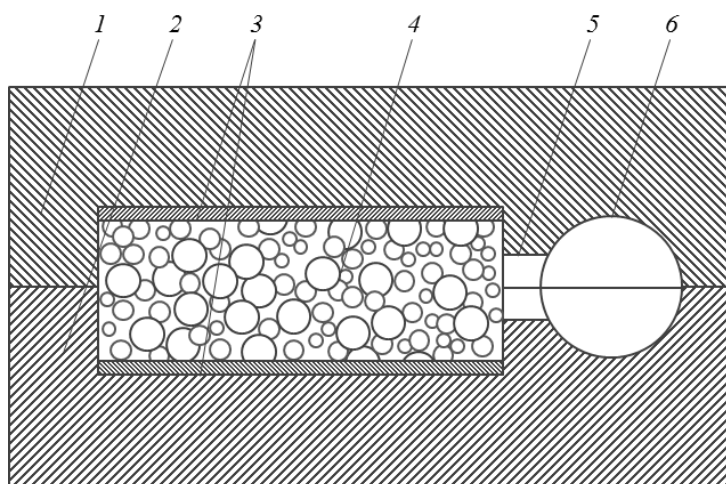


Рис. 1. Схема литья композиционного пеноматериала:

1 – правый полукокиль; 2 – левый полукокиль; 3 – листовая арматура; 4 – гранулы из водорастворимых солей; 5 – питатель; 6 – стояк

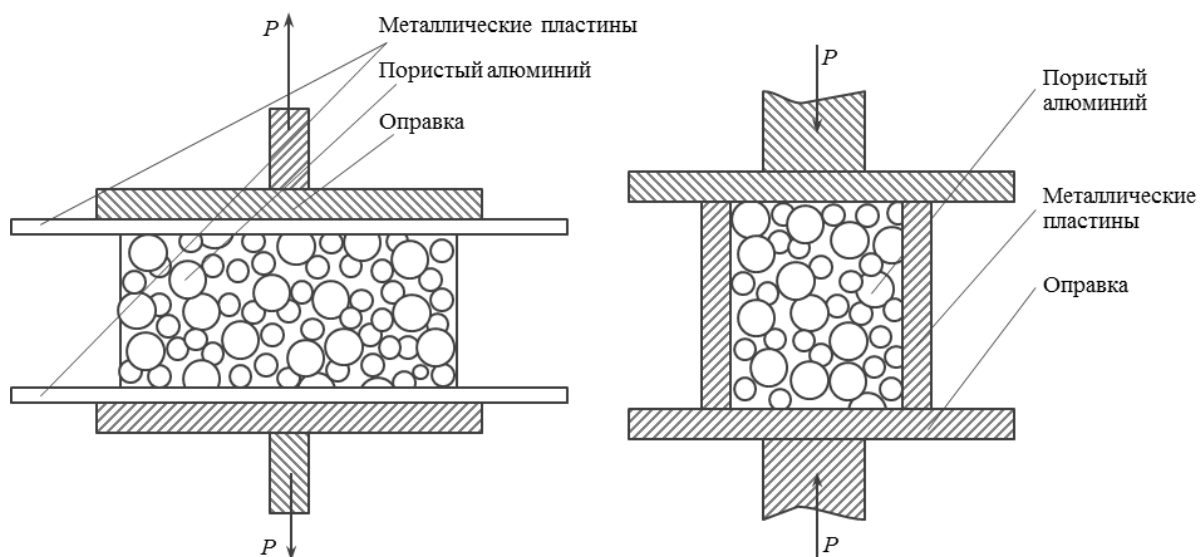


Рис. 2. Схема испытаний образцов при отрыве слоев композита (а) и при сжатии (б)

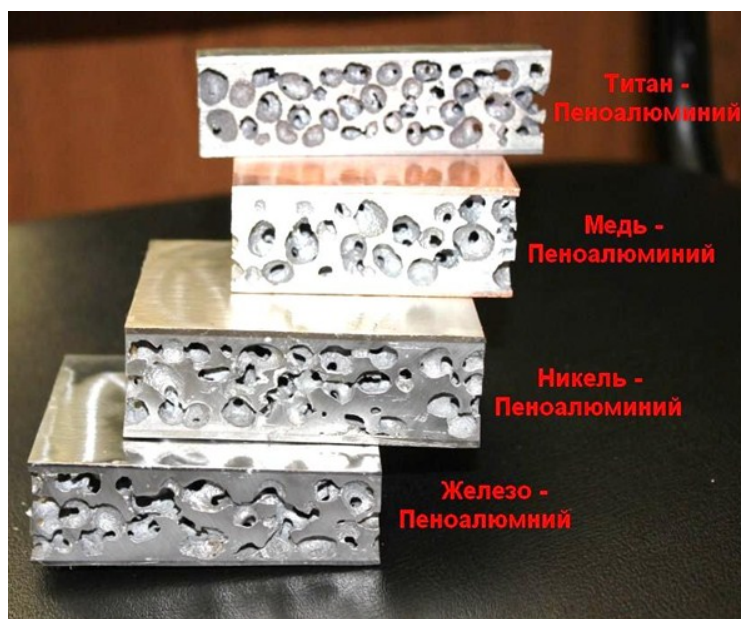


Рис. 3. Внешний вид слоистого композиционного материала



Рис. 4. Внешний вид образцов после разрушения:  
*a* – пеноалюминий–сталь; *б* – пеноалюминий–титан; *в* – пеноалюминий–никель

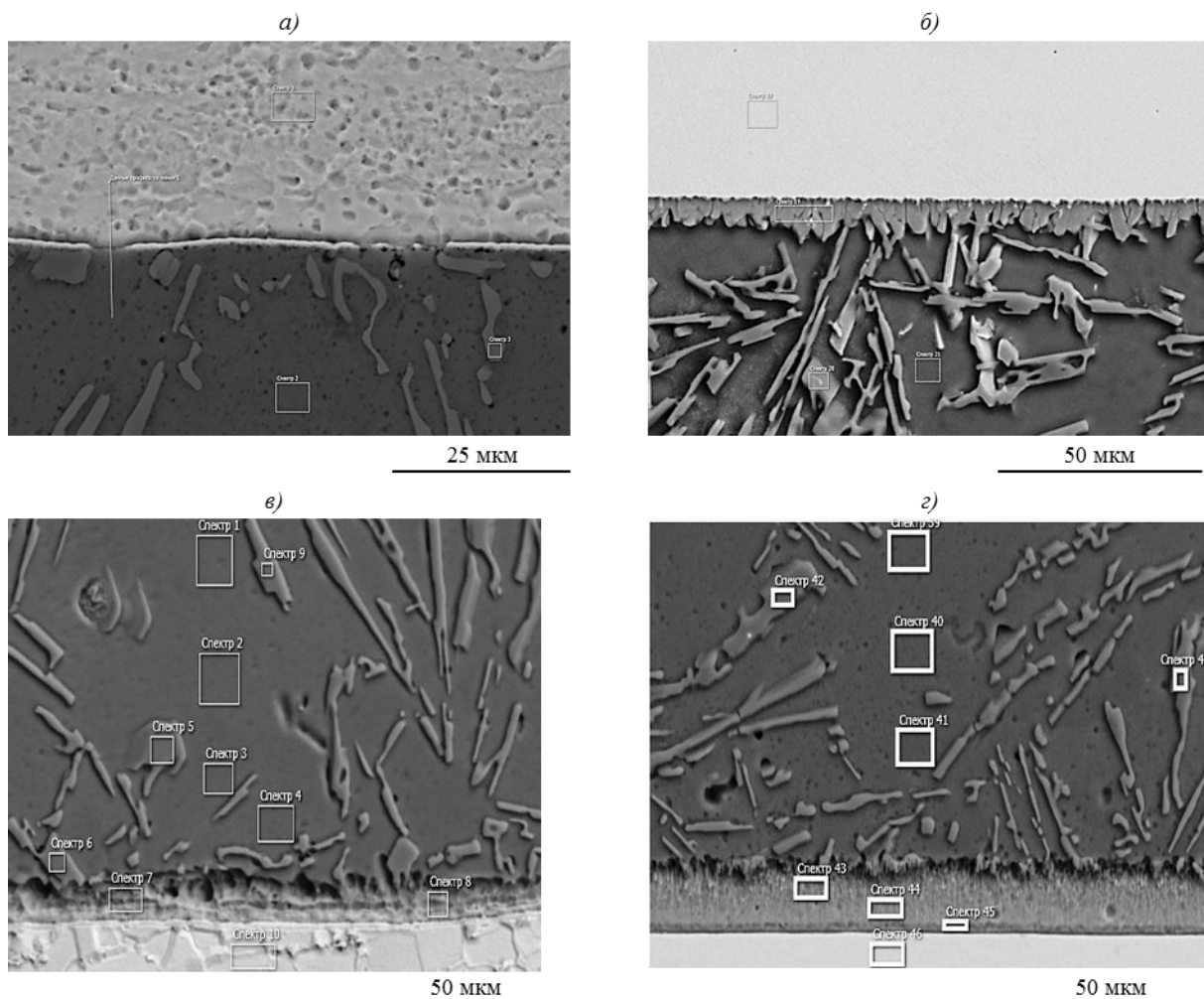


Рис. 5. Микроструктура переходного слоя композиционного материала:  
*a* – пеноалюминий–титан; *б* – пеноалюминий–никель; *в* – пеноалюминий–Ст3;  
*г* – пеноалюминий–сталь 12X18H9T

Таблица 1

## Прочность сцепления слоев пенокомпозита

Материал	Прочность сцепления слоев, МПа (не менее)
Пеноалюминий–титан	11
Пеноалюминий–Ст3	1,8
Пеноалюминий–никель	4,41
Пеноалюминий–сталь 12Х18Н9Т	2,26

Таблица 2

## Прочность и плотность пенокомпозитов

Материал	Толщина пластин, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа
Пеноалюминий	–	1–1,2	11–12
Пеноалюминий–титан	1,35	1,3–1,5	65–70
Пеноалюминий–Ст3	1,2	1,7–1,8	40–45
Пеноалюминий–никель	2	2,4–2,5	70–75
Пеноалюминий–сталь 12Х18Н9Т	2	2,3–2,4	99–105

(рис. 4). Наиболее высокие значения наблюдались при использовании титана и никеля (табл. 1), что, вероятно, связано с более высокой прочностью интерметаллидов титана и никеля, образующихся при формировании композита, по сравнению с прочностью интерметаллидов железа [8].

При армировании композита титаном на границе титана и пеноалюминия формировалась несплошная цепочка интерметаллидов с содержанием титана ~30%, алюминия 26–36% и кремния 34–42% (рис. 5). Толщина интерметаллидного слоя не превышала 1,5 мкм. Несплошность промежуточного интерметаллидного слоя и относительно высокая прочность алюминидов титана обеспечили высокие показатели прочности сцепления титана и пеноалюминия в композиционном материале.

Использование никеля приводит к формированию сплошного переходного интерметаллидного слоя толщиной 5–10 мкм на основе фазы Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, легированной кремнием – до 6%.

Армирование сталью Ст3 вследствие образования на границе слоев композита хрупкой интерметаллидной фазы Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, легированной до 12% кремния, не позволяет достичь высоких показателей прочности сцепления слоев композита.

Использование вместо углеродистой стали легированной стали марки 12Х18Н9Т незначительно повысило прочность сцепления слоев, что объясняется легированием интерметаллидного слоя хромом и никелем, которые повышают проч-

ность интерметаллидов железа [8, 9]. Толщина переходного слоя составляла 14–16 мкм (см. рис. 5).

Испытания при сжатии образцов пенокомпозита показали, что значения предела прочности зависят от природы составляющих композита и толщины армирующего листа. Прочность при сжатии полученных пенокомпозиционных материалов в 4–10 раз выше, чем пеноалюминия. Более высокие значения прочности композита с арматурой из стали марки 12Х18Н9Т обусловлены и большой толщиной используемого листа, и высокими механическими свойствами стали марки 12Х18Н9Т. Однако применение арматуры с высокой плотностью значительно повышает плотность композиционного материала (табл. 2).

## Заключение

Показана возможность получения композиционных материалов пеноалюминий–титан, пеноалюминий–никель, пеноалюминий–сталь жидкофазным способом. Предложенный жидкофазный способ обеспечивает одновременное формирование композиционного материала и слоя пеноалюминия при заливке.

Композиционные материалы, полученные по жидкофазной технологии, по сравнению с пеноалюминием имеют более высокие значения прочности при сжатии при незначительном повышении плотности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Польшкин И.С. Пеноалюминий будущего – пенокомпозит //Технология легких сплавов. 2006. №1–2. С. 210–211.
2. Ковтунов А.И., Семистенов Д.А., Хохлов Ю.Ю., Чермашенцева Т.В. Тепловые условия формирования пеноалюминия фильтрацией через водорастворимые соли //Литейщик России. 2011. №6. С. 43–45.
3. Ковтунов А.И., Семистенов Д.А., Хохлов Ю.Ю., Чермашенцева Т.В. Исследование процессов формирования пеноалюминия фильтрацией через водорастворимые соли //Технология легких сплавов. 2011. №4. С. 74–78.

4. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Семистенов Д.А. Исследование физико-механических свойств пеноалюминия, полученного фильтрацией через водорастворимые соли //Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №6. С. 37–47.
5. Ковтунов А.И., Мямин С.В. Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 9–12.
6. Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Мямин С.В. Исследование процессов жидкофазного формирования покрытий на основе алюминидов никеля //Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №4. С. 24–28.
7. Ковтунов А.И., Мямин С.В., Чермашенцева Т.В. Исследование процессов смачивания стали алюминием при производстве слоистых композитов //Сварочное производство. 2011. №3. С. 8–11.
8. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСиС. 1999. 416 с.
9. Галян Н.Н., Рябцев А.Д. Получение алюминидов железа методом электрошлакового переплава //Металлургия и обработка металлов. 2003. №6. С. 20–22.