

УДК 669.295: 536.46

Канд. техн. наук Ю. А. Белоконь<sup>1</sup>, канд. техн. наук Д. В. Павленко<sup>2</sup>, С. Н. Пахолка<sup>3</sup><sup>1</sup>Запорожская государственная инженерная академия, <sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, <sup>3</sup>АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

## ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СИНТЕЗА

Рассмотрена возможность получения интерметаллидных титановых сплавов для лопаток компрессора газотурбинных двигателей на основе метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Показано, что разработанные составы СВС-смесей и технологические режимы СВС-процесса, позволяют создавать интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана. Результаты микрорентгеноспектрального анализа позволили доказать получение в  $\gamma$ -TiAl сплавов двухфазной структуры с интерметаллидными фазами  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Установлено, что запасы прочности лопаток компрессора современных ГТД, изготовленных из интерметаллидных титановых сплавов, соответствуют требованиям нормативных документов.

**Ключевые слова:** СВС, тепловое самовоспламенение, алюминид титана, структура, свойства, лопатка компрессора, запас прочности.

### Постановка проблемы

Современный этап развития авиационной техники в целом и авиадвигателестроения в частности характеризуется значительными достижениями в области конструирования, технологии изготовления, испытаний и теории управления газотурбинными двигателями (ГТД). Новые конструкторско-технологические решения, применяемые в ГТД пятого поколения, позволили существенно улучшить их тактико-технические характеристики [1]. Основными тенденциями, характерными для разработки ГТД нового поколения, являются применение прогрессивных систем охлаждения, монокристаллических рабочих лопаток турбин, дисков из порошковых материалов, цельных конструкций компрессорных дисков с лопатками (блисков и блингов [2]), сплавов на основе интерметаллидов металлов, композиционных материалов, а также газодинамическое совершенство всех элементов проточной части [1].

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования авиационных двигателей нового поколения является применение в конструкции компрессора и турбины интерметаллидных сплавов на основе алюминидов таких металлов как титан и никель. Например, сплавы на основе алюминидов титана обладают рядом преимуществ по сравнению с титановыми сплавами, а именно они характеризуются более низким

удельным весом, высоким уровнем механических свойств, жаропрочности и жаростойкости [3–5]. В тоже время основными недостатками таких сплавов является высокая стоимость получения связанная с энергозатратным и трудоемким процессом синтеза фаз TiAl и Ti<sub>3</sub>Al, а также низкая пластичность и сложность формообразования аэродинамических поверхностей деталей ГТД в связи с плохой обрабатываемостью резанием. Решение этих задач позволит успешно применять сплавы данного класса в конструкции существующих и перспективных авиационных газотурбинных двигателей.

**Анализ последних исследований.** В настоящее время ученые используют различные методы получения алюминидов титана. Среди них можно выделить выплавку слитков алюминидов титана с применением плазменно-дуговых и индукционных источников нагрева, электрошлакового переплава и получения методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными» флюсами, методы порошковой металлургии [6]. К недостаткам данных методов можно отнести большие затраты электрической энергии, что приводит к повышению себестоимости сплавов, а также большую химическую неоднородность полученного материала. Так, например, технология получения литого сплава Ti-(47–52%)Al-(1–2%)(V, Mn) включает в себя предварительную плавку, 3–5 повторных переплавов

(для гомогенизации) плавящимся вольфрамовым электродом в атмосфере аргона, и затем финальную выплавку в вакууме с разливкой в медные кристаллизаторы [6].

В последнее время широкое исследование получил метод получения интерметаллидных соединений электрошлаковым переплавом [7]. Данная технология существенно не отличается от традиционной, разработанной Институтом электросварки им. Е.О. Патона. В соответствии с методом получения интерметаллидных соединений электрошлаковым переплавом анодный стержень, состоящий из двух слитков необходимых металлов высокой чистоты, опускается до расплавленной шлаковой ванны, содержащей титановую стружку и кальциевые флюсы. Под действием электрического тока проходит переплав стержня с получением необходимого интерметаллидного соединения. К недостаткам данного метода можно отнести большие энергозатраты, сложность оборудования, трудности вызваны с контролем защитной атмосферы, ликвацией полученного материала.

Среди наиболее перспективных методов получения алюминидов титана и сплавов на их основе рассматривается метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). СВС является эффективным методом получения широкого класса материалов и представляет собой сильноэкзотермическое взаимодействие химических реагентов в конденсированной фазе, протекающее в режиме горения [8]. Одним из вариантов проведения СВС-процесса является нагрев с заданной скоростью до такой температуры, при которой начинается объемный саморазогрев системы за счет химической реакции, и СВС проходит в режиме объемного теплового взрыва (теплового самовоспламенения). Высокотемпературный синтез в режиме теплового самовоспламенения чаще всего используется для систем со сравнительно невысоким экзотермическим эффектом химической реакции взаимодействия реагентов, в частности, систем для синтеза интерметаллидов. У таких систем невысокая адиабатическая температура реакции, вследствие чего они не могут гореть при комнатной начальной температуре. Для осуществления синтеза интерметаллидов необходимо повысить температуру синтеза за счет предварительного подогрева шихты для проведения синтеза в режиме теплового самовоспламенения. Наиболее распространенный способ осуществления синтеза в режиме теплового самовоспламенения является линейный нагрев с постоянной скоростью в широком интервале скоростей: от 0,5 до 2000 К/мин. Этим способом синтезировано наибольшее число материалов. В первую очередь, это интерметаллиды (в основном алюминиды металлов) и композиты на их основе.

В работах [9, 10] было обосновано применение сплавов на основе алюминидов титана в качестве материала для деталей ГТД. Учитывая уровень физических и механических свойств сплавов на основе алюминидов титана, в конструкции ГТД они могут эффективно применяться в качестве материала для деталей ротора компрессора высокого давления, а также турбины низкого давления. При этом, например, являясь заменителями железоникелевых сплавов типа ЭП718-ИД, применяемыми в настоящее время изготовления лопаток компрессора высокого давления рабочая температура которых может составлять порядка 550 °С и сплавов на никелевой основе типа ЭИ-437Б, используемых для изготовления дисков компрессора, основной эффект от применения сплавов на основе интерметаллидов заключается в снижении их массы, что способствует как снижению массы двигателя в целом так и снижению уровня динамических нагрузок на его ротор.

Учитывая принципиальные отличия получения сплавов на основе интерметаллидов путем СВС синтеза от традиционных способов, а также перспективы данного способа с экономической точки зрения, большой интерес представляет исследование процессов структурообразования продуктов синтеза и их механические свойства, полученные при нестационарных температурных условиях для применения в качестве исходного сырья для получения конструкционных материалов для деталей ГТД.

**Цель и постановка задачи.** Целью настоящей работы являлась оценка возможности получения сплавов на основе алюминидов титана методом СВС и их применения в конструкции компрессора ГТД. Для достижения поставленной цели были решены задачи, связанные с исследованием структуры и фазового состава образцов синтезированных сплавов, а также оценки прочностной надежности лопаток компрессора ГТД, изготовленных из сплавов на основе алюминидов титана.

### Методики исследования

Объектом исследования выбраны интерметаллидная система Ti-Al с получением  $\gamma$ -TiAl сплавов. Данная система относится к группе интерметаллидных систем, в которых адиабатическая температура горения ниже температуры плавления образующегося соединения  $T_{пл} < T_{ад}$  (табл. 1).

Для получения интерметаллидных сплавов в качестве исходных материалов применяли металлические порошки титана (ПТЭМ-1) и алюминия (АСД1) дисперсностью 100...150 мкм. Перед смешиванием порошки просушивали при температуре 75...120 °С в течение 3 часов. Смешивание порошков проводили в стальных шаровых мельницах в течение 2 часов. Соотношение ком-

Таблица 1 – Параметры СВС-систем

Реакция $R_1 + R_2 \rightarrow P$	$T_{пл}(R_1)$ , К	$T_{пл}(R_2)$ , К	$T_{пл}(P)$ , К	$T_{ал}$ , К
$Ti + Al \rightarrow TiAl$	1941	933	1733	1654

понентов выбиралось со стехиометрических расчетов для получения интерметаллидных фаз  $\gamma$ -TiAl. Подготовленную таким образом смешанную реакционную смесь взвешивали на электронных весах и засыпали в ректор. Температуру образцов в процессе синтеза контролировали при помощи W-Mo-термопарой с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Для компактирования продуктов СВС синтеза использовали гидравлический пресс ПСУ-125. Образцы формировали цилиндрической формы диаметром 25 мм и высотой 30 мм. Важную роль играла плотность образцов, так как режим теплового самовоспламенения наблюдался только для образцов высокой плотности на уровне 0,8...0,55 от плотности компактного металла.

Пористость прессовок оценивали путем гидростатического взвешивания и по результатам анализа микрофотографий шлифов при помощи программы Image Pro Plus. Гидростатическое взвешивание выполняли для образцов без защиты поверхности и с защитой, что дало возможность оценить долю закрытых и открытых пор. Взвешивание выполняли в дистиллированной воде при температуре  $25^\circ\text{C}$  с точностью 0,01 г. Плотность воды составляла  $0,997 \text{ кг/м}^3$ . При оценке пористости принимали плотность компактных образцов для сплава на основе  $\gamma$ -TiAl равной  $3800 \text{ кг/м}^3$ .

Структуру образцов изучали при помощи оптического и электронного растрового микроскопов в отраженных электронах на образцах, вырезанных из различных частей образца электроэрозионным способом. Химический микроанализ основных структурных составляющих материала наплавки выполняли на растровом электронном микроскопе SUPRA 40WDS. Исследование производили при ускоряющем напряжении 19 кВ, разрешающей способности 1 нм. Микроанализ выполняли с поверхности травленого шлифа методом записи интенсивности характеристического рентгеновского излучения анализируемых химических элементов в определенных точках и вдоль траектории сканирования.

Для оценки напряженно-деформированного состояния пера лопаток выполняли прочностной анализ методом конечных элементов в универсальной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Твердотельную модель лопатки создавали в UNIGRAPHICS NX. В пере и хвостовике лопатки вентилятора выполняли построение комбинированной конечно-элементной сетки, состо-

ящей из 10-узловых тетраэдров и 20-узловых гексаэдров. Использовали трехмерные тетраэдральные прочностные конечные элементы SOLID 186. Для предварительного разбиения плоскостей использовали 8-узловые конечные элементы SHELL 281. Расчет выполняли для перспективной лопатки ротора компрессора короткоциклового авиационного двигателя.

Коэффициент запаса прочности лопаток компрессора ГТД определяли используя зависимость [11]:

$$n_a = \frac{\sigma_{-1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)}{K_\sigma^* \cdot \sigma_a}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости образцов при симметричном цикле нагружения, МПа;

$\sigma_a$  – амплитуда действующих переменных напряжений, МПа;

$\sigma_m$  – постоянные напряжения, МПа;

$\sigma_b$  – предела прочности материала, МПа;

$K_\sigma^*$  – обобщенный эффективный коэффициент концентрации напряжений.

**Изложение основного материала.** Анализ экспериментально установленной зависимости температуры процесса от времени синтеза показывает (рис. 1, а), что в течение первых 100 с протекает процесс инертного линейного нагрева, и только при достижении температуры плавления алюминия 933 К начинается быстрый рост температуры (стадия теплового самовоспламенения). При этом увеличение температуры до максимального значения 1654 К происходит всего за 23 секунды, затем 4...5 секунд сохраняется максимальное значение температуры после чего начинается процесс остывания образца.

Общий вид синтезированного методом СВС образца из сплава на основе алюминид титана TiAl показан на рис. 1, б. Исследование пористости методом гидростатического взвешивания показали, что образец, не подвергавшийся дальнейшему прессованию после прохождения синтеза, имел общую пористость  $40 \pm 1,5 \%$ , закрытая пористость составляла 37,8 %, открытая – 2,2 %. Полученные значения пористости объясняются рядом факторов. Во-первых, отрицательным объемным эффектом реакций СВС, связанным с

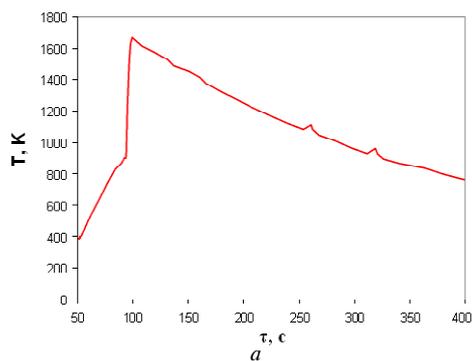


Рис. 1. Зависимость температуры процесса от времени протекания реакции при тепловом самовоспламенении порошковой смеси Ti-Al (а) и общий вид образца алюминидов титана, синтезированного методом СВС (б)

тем, что молярный объем продуктов СВС синтеза обычно меньше молярного объема реагентов. Во-вторых, выделением примесных газов при превращении шихты в конечный продукт. При обычном спекании материалов таких эффектов не наблюдается. Следует отметить, что дальнейшее снижение общей пористости образцов из  $\gamma$ -TiAl сплава зависит от величины давления, времени выдержки под давлением и температуры пористой заготовки после прохождения теплового взрыва, отвечающей за температуру начала прессования.

Исследование закономерностей тепловыделения при тепловом самовоспламенении позволило установить следующую последовательность превращений при образовании фазы  $\gamma$ -TiAl. Начальная стадия структурообразования алюминидов титана — плавление алюминия, вызванное тепловым импульсом, и его дальнейшее растекание по каналам капиллярно-пористой среды. В силу этого первую стадию можно назвать стадией инертного нагрева достаточно условно, так как взаимодействие реагентов и здесь идет, но оно слабое, с малым тепловым эффектом по сравнению с получением тепла от внешнего источника, и практически не влияет на зависимость температур от времени.

Дальнейшая диффузия атомов алюминия в решетку частиц титана приводит к зарождению в диффузионной зоне интерметаллидных соединений  $TiAl_3$ . Скорость образования первых кристаллов интерметаллидной фазы определяется выражением:

$$u = 11,7 \cdot 10^{17} \exp\left(-\frac{42000}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с}. \quad (2)$$

При образовании интерметаллида возникают внутренние сжимающие и внешние стягивающие напряжения, при этом происходит наращивание слоя  $TiAl_3$ , что приводит к обеднению алюминиевой массы и последующему зарождению

моноалюминидов титана ( $\gamma$ -TiAl). При распространении процесса вглубь титановой массы концентрация алюминия уменьшится, что станет причиной зарождения интерметаллида  $Ti_3Al$ . Заключительной стадией структурообразования является выравнивание состава интерметаллидных слоев, в первую очередь, благодаря перекристаллизации фазы  $Ti_3Al$  в TiAl (рис. 2).

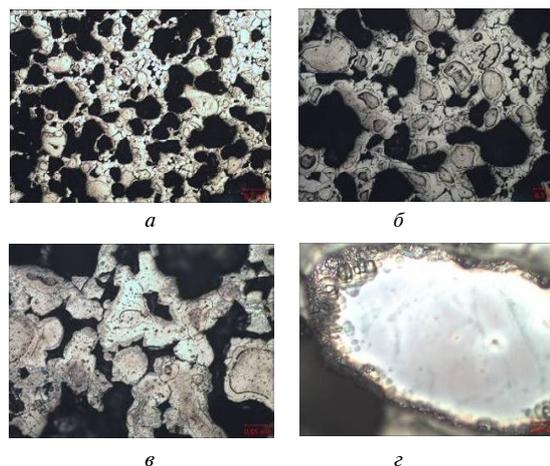
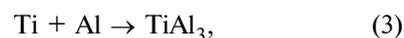


Рис. 2. Формирование структуры  $\gamma$ -TiAl сплава в процессе синтеза:  
а —  $\times 50$ ; б —  $\times 100$ ; в —  $\times 200$ ; г —  $\times 500$

Исследование данных закономерностей позволило установить следующую последовательность химических реакций:



Проведенные расчеты изменения свободной энергии Гиббса  $\Delta G$  при образовании различных алюминидов из алюминия и титана подтвердили, что во всем температурном диапазоне наименьшей энергией из стабильных интерметаллидов обладает  $TiAl_3$  (рис. 3). Несколько ниже

$\Delta G$  у метастабильных фаз  $TiAl_2$  и  $Ti_2Al_5$ , но они могут формироваться только через несколько промежуточных реакций трансформации  $TiAl$ , что термодинамически маловероятно.

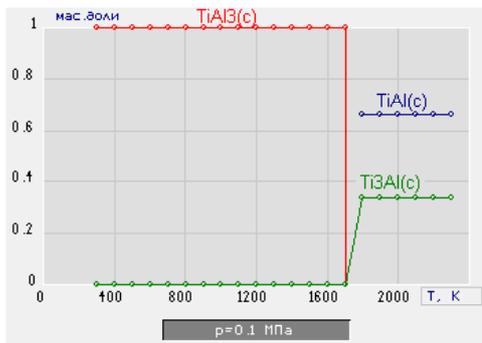
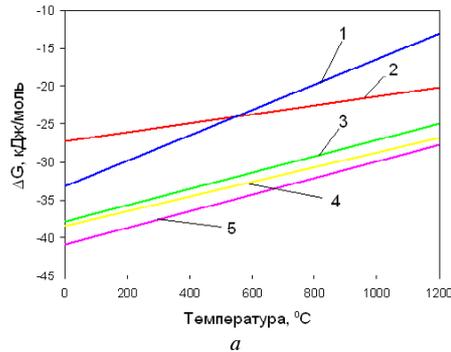


Рис. 3. Термодинамический анализ образования  $\gamma$ -TiAl сплава:

*a* – изменение свободной энергии при образовании интерметаллидов при различных температурах;  
*б* – расчет равновесного состава; 1 – TiAl, 2 –  $Ti_3Al$ , 3 –  $TiAl_3$ , 4 –  $Ti_2Al_5$ , 5 –  $TiAl_2$

Таким образом, установлено, что особенность системы Ti-Al состоит в том, что ниже температуры 1300 K в данной системе происходит одностороннее растворение жидкого алюминия в твердом титане, а выше этой температуры растворимость твердого титана в расплаве заметно увеличивается. На этой стадии происходит основное превращение продукта, в расплаве алюминия кристаллизуются зерна новой фазы TiAl и  $Ti_3Al$ . С сокращением доли расплава реакция тормозится. Результаты микроанализа обнаружили равномерное и мелкодисперсное распределение алюминия титана TiAl (рис. 4). Анализ структуры синтезированных методом СВС образцов показал, что система TiAl, как и было предусмотрено, является двухфазной: TiAl серого цвета и  $Ti_3Al$  белого цвета.

С применением микрорентгеноспектрального анализа определяли химический состав сплава в различных участках микрошлифа поверхности (рис. 5). Содержание компонентов определяли в атомных и массовых процентах. В результате количественного анализа установлено, что матрица

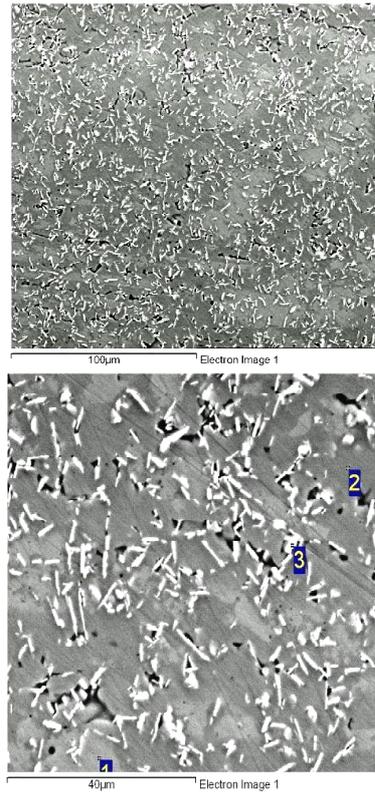


Рис. 4. Результаты микроструктурного анализа полученного алюминид титана:

1 – фаза  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$ ; 2 –  $\gamma$ -TiAl; 3 –  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$

(серая область)  $\gamma$ -TiAl сплава имеет состав в массовых процентах: 38,62 % Al и 61,38 % Ti, что отвечает интерметаллидной фазе TiAl (рис. 5, *a*, спектр 2). Вытянутые, белые по цвету области, по результатам микрорентгеноспектрального анализа (рис. 5, *a*, спектр 4) представляют собой интерметаллиды состава  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$ , с содержанием элементов в массовых процентах: 22,83 % Al и 77,17 % Ti.

Вблизи этих включений, а в некоторых случаях и внутри их обнаружены дисперсные упрочняющие фазы. Показания точечного химического анализа (рис. 5, *a*, спектр 1) позволили идентифицировать их как интерметаллиды  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$ , содержащие в массовых процентах – 28,19 % Al и 71,81 % Ti. Это согласуется с результатами, полученными в работах [12, 13].

Для уточнения полученных данных проводили микрорентгеноспектральный анализ по линии (рис. 5, *б*). В левой части траектории сканирования отмечены пики алюминия, что подтверждает кристаллизацию интерметаллидной фазы в сплаве в виде моноалюминид титана TiAl. Дальнейшее движение по траектории сканирования (рис. 5, *б*) в область фазы вытянутой формы показывает рост содержания титана. Это согласуется с результатами точечного анализа и указывает на образование интерметаллидной фазы  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$ .

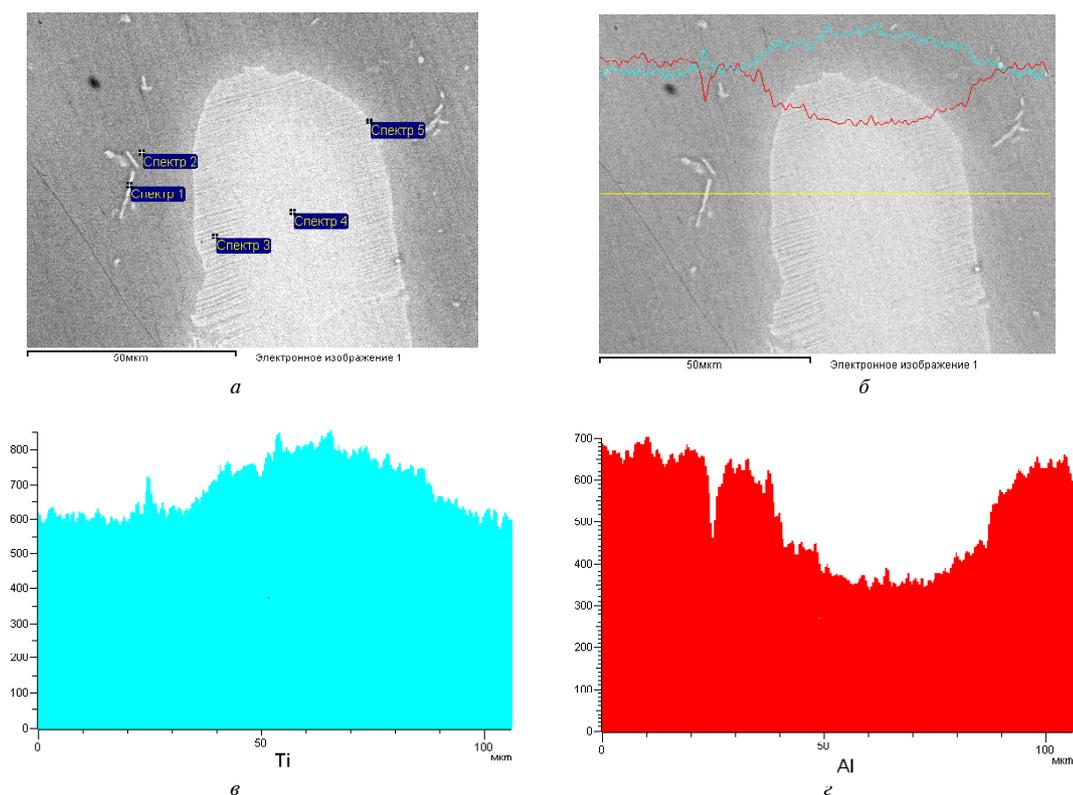


Рис. 5. Результаты микрорентгенспектрального анализа  $\gamma$ -TiAl сплава:

*a* – места определения точечного химического анализа сплава; *б* – изменение интенсивностей излучения при движении; *в* – распределение титана; *г* – распределение алюминия

Результаты микрорентгенспектрального анализа позволили доказать получение в  $\gamma$ -TiAl сплаве двухфазной структуры с интерметаллидными фазами TiAl и Ti<sub>3</sub>Al. Также, установлено, что вследствие высокой температуры синтеза, в процессах СВС имеет место самоочистка продукта от примесей, что сводит к минимуму вероятность появления примесных атомов. Определение на микроскопе SUPRA 40WDS в СВС-сплаве кислорода, углерода и других примесей не показала их наличие.

Таким образом, анализ структуры синтезированных образцов показывает, что СВС позволяет получать сплавы на основе алюминидов титана. Однако заготовки, получаемые в результате синтеза, не могут быть использованы в качестве конструкционного материала для изготовления ответственных деталей ГТД так как при пористости порядка 40 % имеют недостаточный уровень прочностных свойств. Альтернативными вариантами технологии получения из синтезированных СВС заготовок полуфабрикатов с высоким уровнем механических свойств является металлургический передел с последующей термомеханической обработкой [14] или технологии интенсивного уплотнения синтезированных заготовок [15]. Применение этих технологий позволит выполнить дополнительное легирование синтезирован-

ных сплавов, что позволит получить конструкционные материалы привлекательные для применения в авиационной технике.

Исследования синтезированных заготовок и анализ технологий получения из них полуфабрикатов показывают, что синтез методом СВС исходных заготовок для дальнейшего передела или интенсивного уплотнения, с учетом дополнительного легирования является перспективным, с точки зрения энергозатрат, способом изготовления новых конструкционных материалов. Таким образом, получаемые по данной технологии материалы после дополнительной обработки по уровню механических свойств могут соответствовать сплавам, получаемым по технологии металлургического передела, примеры которых приведены в работах [4].

Для оценки возможности применения сплавов на основе интерметаллидов титана в конструкции ГТД выполнен анализ прочностной надежности лопаток компрессора современного авиационного двигателя, изготовленных из сплава на основе алюминидов титана. Напряженно-реформированное состояние пера лопатки определяли в результате расчета методом конечных элементов. Для модели материала применяли механические свойства сплава «гамма», обладающего двухфазной структурой, приведенные в табл. 2.

Таблица 2 – Механические и физические свойства сплава [4]

$E$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\mu$	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
$0,95 \cdot 10^5$	3800	720	650	0,3	1,6	2

Изменение напряженно-деформированного состояния пера лопаток из сплавов на основе алюминидов по сравнению с серийно изготавливаемыми лопатками из титановых и железоникелевых сплавов, и, следовательно, прочностной надежности, связано с одновременным изменением их основных физических и механических характеристик. С одной стороны они характеризуются меньшей величиной плотности и модуля упругости (табл. 2), что приводит к снижению уровня действующих напряжений. С другой стороны предельно допустимые напряжения для таких сплавов ниже, чем, например, для железоникелевых сплавов [16]. Таким образом, для оценки эффективности применения сплавов на основе интерметаллидов требует проведения оценки прочностной надежности изготавливаемых из них деталей.

Расчетные значения поля распределения напряжений в пере лопатки при взлетном режиме работы двигателя показаны на рис. 6. Расчет запаса прочности по максимальным напряжениям в пере лопатки с учетом действия переменных и постоянных напряжений показал, что он находится в диапазоне, удовлетворяющем требованиям, предъявляемым к рабочим лопаткам компрессора [17].

Предложенная СВС технология – альтернатива традиционным технологиям получения материалов и изделий, основанная на использовании внешних источников тепла. Характерные черты предлагаемой технологии: использование более дешевой внутренней химической энергии взаимодействия реагентов вместо внешней электрической, простота и дешевизна оборудования благодаря отсутствию внешнего источника тепла, большая скорость процесса (малое время синте-

за) и высокая производительность. Из вышеприведенного видно, что производство материалов в условиях СВС отличается от печных аналогов большей экономией электроэнергии, производственных площадей, сокращением числа технологических операций, увеличением производительности труда, в целом проявляется в снижении себестоимости продукции.

### Выводы

В результате исследований показано, что разработанные составы СВС-смесей и технологические режимы СВС-процесса, позволяют создавать интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана. Результаты микрорентгеноспектрального анализа позволили доказать получение в  $\gamma$ -TiAl сплаве двухфазной структуры с интерметаллидными фазами  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Установлено, что запасы прочности лопаток компрессора современных ГТД, изготовленных из интерметаллидных титановых сплавов, соответствуют требованиям нормативных документов.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что технология получения перспективных для авиационной техники интерметаллидных титановых сплавов на основе метода СВС синтеза является перспективной с точки зрения качества и себестоимости получаемых полуфабрикатов сплавов конструкционного назначения. Получение необходимого комплекса удовлетворительных прочностных и пластических свойств требует продолжения исследований по нахождению оптимального соотношения легирующих элементов и термопластического деформирования путем технологии интенсивного уплотнения синтезированных заготовок.

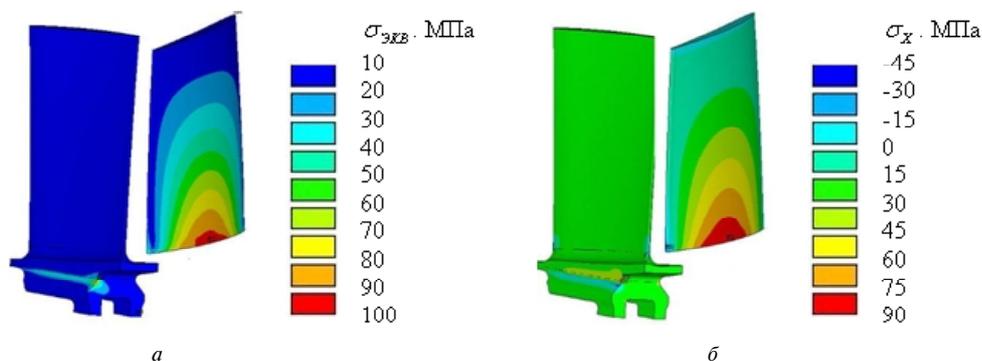


Рис. 6. Поля распределения эквивалентных (а) и радиальных (б) напряжений в пере лопатки компрессора ГТД из сплава на основе алюминидов титана на взлетном режиме работы

**Список литературы**

1. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / [В. И. Бакулев, В. А. Голубев, Б. А. Крылов и др.] ; под редакцией В. А. Сосунова, В. М. Чопкина. – М. : изд-во МАИ, 2003. – 688 с.
2. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье : изд. ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
3. Теплофизические характеристики  $\gamma$ -сплава алюминидов титана / [К. Б. Исаев, А. А. Рогозинская, С. В. Ахонин и др.] // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. – 2009. – № 10. – С. 128–131.
4. Иванов В. И. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов  $Ti_3Al$  и  $TiAl$  для работы при температурах 600–800 °С в авиакосмической технике / В. И. Иванов, К. К. Ясинский // Технология легких сплавов. – 1996. – № 3.
5. Анташев В. Г. Разработка технологии получения литых деталей из интерметаллидного сплава  $TiAl$  и их использование в конструкциях / В. Г. Анташев В. И. Иванов, К. К. Ясинский. – 1996. – № 3.
6. Имаев В. М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных  $\gamma$ - $TiAl$  сплавов / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, Т. И. Оленева // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1. – С. 25–31.
7. Рябцев А. Д. Исследование возможности получения титан-алюминиевого сплава методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными» кальцийсодержащими флюсами / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2000. – № 1. – С. 3–5.
8. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
9. Куликовский Р. А. Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении / Р. А. Куликовский, С. Н. Пахолка, Д. В. Павленко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научных трудов. – Вып. 80. – Дн-вск. : ПГАСА, 2015. – С. 369–372.
10. Салищев Г. А. Использование режимов сверхпластической деформации для изготовления изделий из интерметаллидов / [Г. А. Салищев, Р. М. Имаев, А. В. Кузнецов и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 4. – С. 23–28.
11. Серенсен С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие / С. В. Серенсен, В. П. Коганов, Р. М. Шнейдерович ; под ред. С. В. Серенсена. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
12. Sereda B. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology / B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // TMS 2010. – Seattle. Washington, USA. – 2010. – P. 99–108.
13. The Processes Research of Structurization of Titan Aluminides Received by SHS / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // Material Science & Technology. – Pittsburg, USA. – 2009. – P. 2069–2073.
14. Камерный электрошлаковый переплав (КЭШП) – новый метод получения высококачественных слитков титана и титановых сплавов. Электронный ресурс. Режим доступа на 01.01.2016 <http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/materials/ukrainian/>
15. Павленко Д. В. Ресурсосберегающая технология получения деформированных полуфабрикатов для авиационной техники на основе метода интенсивной пластической деформации / Д. В. Павленко, О. В. Овчинников // XVI International scientific conference New technologies and achievement in metallurgy, material engineering and production engineering. – Czestochowa. – 2015. – С. 205–208.
16. Строение и свойства авиационных материалов / [А. Ф. Белов, Г. П. Бенедиктова, А. С. Висков и др.] ; под ред. Белова А.Ф., Николенко В.В. – М. : Металлургия, 1989. – 368 с.
17. ОСТ 1 00304-79 Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждений лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов. – 15 с.

*Поступила в редакцию 21.01.2016*

**Белоконь Ю.А., Павленко Д.В., Пахолка С.М. Отримання інтерметалідних титанових сплавів для деталей компресора газотурбінних двигунів на основі методу саморозповсюджувального високошвидкісного синтезу**

*Розглянуто можливість отримання інтерметалідних титанових сплавів для лопаток компресору газотурбінних двигунів на основі методу саморозповсюджувального високо-температурного синтезу (СВС). Показано, що розроблені склади СВС-сумішей і технологічні режими СВС-процесу, дозволяють створювати інтерметалідні сплави на основі алюмінідів титану. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу дозволили довести отримання в  $\gamma$ -TiAl сплаві двофазної структури з інтерметалідними фазами  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Встановлено, що запас міцності лопаток компресора сучасних ГТД, виготовлених з інтерметалідних титанових сплавів відповідає вимогам нормативних документів.*

**Ключові слова:** СВС, теплове самозапалювання, алюмінід титану, структура, властивості, лопатка компресора, запас міцності.

**Belokon' Yu., Pavlenko D., Pakholka S. Obtaining intermetallic titanium alloys for compressor blades of gas turbine engines based on the method of self-propagating high-temperature synthesis**

*The possibility of obtaining intermetallic titanium alloys for compressor blades of gas turbine engines based on the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). It was shown that the developed formulations of SHS mixtures and technological modes of SHS process, allow to create intermetallic alloys based aluminides titanium. The results of microprobe analysis were used to prove the receipt of  $\gamma$ -TiAl in a two-phase structure of the alloy with intermetallic phase  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. It was established that the safety factor of the compressor blades of modern gas turbine engine made of intermetallic titanium alloys meet the requirements of normative documents.*

**Key words:** SHS, thermal self-ignition, titanium aluminide, structure, properties, compressor blades, safety factor.