

УДК 629.786.085

**В.П. СОЛНЦЕВ¹, В.В. СКОРОХОД¹, Г.А. ФРОЛОВ¹, К.Н. ПЕТРАШ¹,
Т.А. СОЛНЦЕВА¹, А.М. ПОТАПОВ², И.А. ГУСАРОВА²**

¹ *Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,*

² *Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Украина*

РАЗРАБОТКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Большая часть поверхности многоразовых космических систем типа «Шаттл» и «Буран» была защищена суперлегкой плиточной защитой из волокна на основе кварцевых волокон. Однако эти плитки имели низкие механические характеристики и часто разрушались под воздействием случайных механических ударов. В связи с этим был разработан новый жаростойкий дисперсно-упрочненный сплав на основе ниобия с пониженной плотностью (до 6000 кг/м³), который существенно легче металлических сплавов, применяемых в настоящее время для тепловой защиты многоразовых космических систем. Проведены механические испытания сплава на разрыв при температурах до 1200 °С. В процессе термоциклирования (нагрев до 1200 °С и охлаждение до комнатной температуры) показано, что разработанный сплав за 100 циклов по 20 минут дал уменьшение массы на 0,00074 г/см².

Ключевые слова: *дисперсно-упрочненный сплав, ниобий, термоциклирование, термомеханика, жаростойкость, физико-механические характеристики.*

Введение

Тепловая защита, которая использовалась на многоразовых космических системах (МКС) типа Спейс Шаттл и Буран изготавливалась из углерод-углеродных материалов, и суперлегкой плитки из легкого армированного волокна на основе кварцевых нитей с удельным весом 110-250 кг/м³. Однако, эти плитки имели низкие механические и термоэрозионные характеристики и часто разрушались под воздействием твердых частиц и случайных механических ударов.

31-ая Европейская ежегодная конференция по композиционным материалам и конструкциям, предназначенным для гиперзвуковых теплозащитных систем (ТЗС), которая состоялась в январе 2007 года, предложила список материалов для решения этой задачи. Было показано, что использование металлических сплавов для тепловой защиты новых систем в европейских странах является перспективным направлением. Металлическая ТЗС обычно работает при температурах от 1100 до 1200 °С. Например, сплав РМ 1000 с высоким содержанием никеля и железо-хромовый сплав РМ 2000 с относительной плотностью ~8000 кг/м³, устойчивы к окислению при высоких температурах вплоть до 1100 °С и могут быть использованы для изготовления металлических ТЗС. Однако основными недостатками

существующих металлических ТПС является довольно большой вес, недостаточный ресурс и низкий уровень рабочих температур. Разработка новых материалов с более низким удельным весом, улучшенными механическими и термоэрозионными свойствами требует передовых научных подходов и технологий.

В этой работе предложена технология производства сплава на основе ниобия, который имеет удельный вес до 6000 кг/м³, и может работать в течение длительного времени при температуре до 1200 °С.

1. Постановка задачи

В работах [1, 2] впервые теоретически и экспериментально обнаружена одна из самых, казалось бы, простых автоколебательных реакций взаимодействия кислорода с металлами, которая вероятно является основой химической, а впоследствии и биологической эволюции. Именно в механизме этой реакции заложены различные эволюционные траектории, обуславливающие тот или иной конечный результат. Образуется ли плотная пленка оксида, защищающая материал от дальнейшего разрушения, или возникают термокинетические колебания, которые могут привести к его разрушению. Поэтому главной задачей исследований, включающих разработку моделей топочимического взаимодействия молекулярных

газов, экспериментального изучения процессов окисления, является установление механизмов образования плотной пленки оксидов.

Работа включает как теоретическое, так и экспериментальное изучение процессов окисления конкретных материалов на основе ниобия, влияния легирующих компонентов и ингредиентов на жаростойкость и формирования необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств композиций. Кроме того, рассмотрены два важных технологических аспекта. Первый заключается во введении в нанодисперсном состоянии дисперсноупрочняющих добавок, например, оксида иттрия или лантана, что позволило увеличить высокотемпературную прочность при сохранении высокой технологической пластичности. Другой технологический аспект связан с разработкой методов реакционного спекания, позволяющего эффективно использовать влияние необратимых процессов реакционного взаимодействия на консолидацию порошкового материала [3], а также формирование структуры и новых свойств. Так при использовании такого метода в [4] получен материал на основе нихрома, характеристики пластичности практически в два раза выше его аналога, полученного по традиционной металлургической технологии, а циклическая жаростойкость при температурах до 1200 °С более, чем на порядок.

В работах [3, 4] разработаны научные основы реакционного спекания порошковых композиций, в условиях высокоэнергетического выделения запасенной внутренней энергии компонентов порошковой смеси. Особым достоинством такой технологии является высокая скорость процесса [5] и полное стирание эффекта наследственности исходного порошкового объекта.

2. Материалы и методика исследований

Исходные смеси чистых компонентов готовились путем смешивания в эксцентриковом смесителе в течение 6 часов с шарами из стали ШХ15. Для разработки сплава на основе ниобия использовался ниобий порошковый электролитический дисперсностью меньше 63 мкм, титан натрий термический - меньше 10 мкм и распыленный алюминий - меньше 63 мкм. Для исключения неоднородности шихты при засыпке в пресс-форму вводилось 0,05 % глицерина. Образцы прессовали в стальной пресс-форме с двусторонним приложением нагрузки на прецизионном механическом прессе.

Характер спекания и поведение при окислении изучалось с применением непосредствен-

ного термического анализа. Для этого в образцы были установлены хромель-алюмелевые термопары, которые располагались вдоль с шагом 4 мм одна от другой (первая на расстоянии 2 мм от поверхности). Односторонний нагрев проводили на гелиоустановке. Регистрация изменения температуры реакционной системы осуществлялась с помощью быстродействующей компьютеризированной системы записи сигналов на основе аналогового цифрового преобразователя.

Гелиоустановка, представляет параболический концентратор лучистой энергии диаметром 2 м. Установка снабжена автоматической системой слежения за Солнцем, обеспечивающей постоянное значение теплового потока, подводимого к поверхности образца в течение всего эксперимента. Регулировка плотности теплового потока осуществлялась путем изменения угла открытия жалюзи и расстояния до фокуса концентратора (рис. 1). На этой установке также проводилось большинство исследований аблирующих теплозащитных материалов [6].

Значение теплового потока выбиралось в зависимости от необходимой скорости и температуры нагрева образцов и, как правило, не превышало 3000 кВт/м².

Изучение термокинетики реакционного взаимодействия с участием жидкой фазы проводилось также в трубчатой печи сопротивления при градиентном нагреве со стороны торца цилиндрических образцов диаметром 10 мм и длиной 12-15 мм при их продвижении в зону нагрева.

Инициирование проводилось в трубчатой печи сопротивления с заданной изотермической температурой, которая превышала или была близка к температуре плавления самой низкоплавкой эвтектики или перитектики.

3. Закономерности формирования порошковых смесей на основе ниобия

На начальном этапе работы изучалось поведение при прессовании порошка ниобия и двойных смесей его с титаном, который является основным легирующим компонентом разрабатываемого материала.

Как оказалось, в силу высокой пластичности ниобия порошок его великолепно уплотняется (рис. 2). Максимальная относительная плотность прессовок составляет 92,5 %

При введении титана в интервале 30-45 % наблюдается снижение уплотняемости прессовок во всем диапазоне давлений прессования. Формуемость смесей ограничивается нижней границей давления прессования 200 МПа. В области давлений прессования 500-700 МПа

наблюдается перегиб на кривых уплотнения, что связано, вероятно, с разрушением поверхностных пленок оксидов.

Этой склонностью обладают металлы VA группы Периодической системы – ванадий, ниобий и тантал.



Рис. 1. Гелиоустановка, на которой проводилось исследование термокинетики реакционного взаимодействия при получении сплава на основе ниобия: 1 – жалюзи; 2 – параболическое зеркало \varnothing 2 м

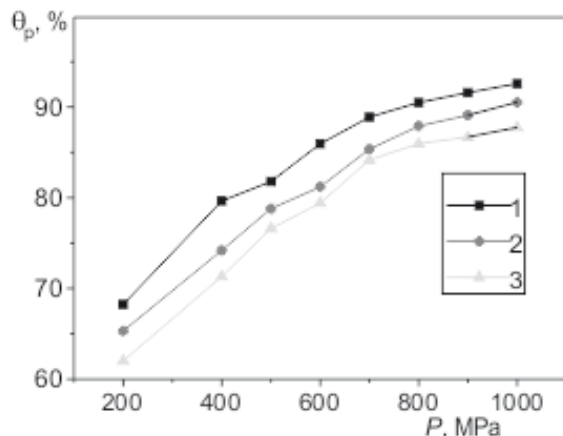


Рис. 2. Зависимость относительной плотности прессовок от давления прессования:
1 – Nb; 2 – Nb+30%Ti; 3 – Nb- 45% Ti.
Здесь θ_r – относительная плотность после прессования; P – давление прессования

Необходимость детального изучения влияния отдельных компонентов разрабатываемого материала связана также с характером поведения прессовок из смесей при спекании. Не все компоненты активируют спекание, а, наоборот, наиболее часто наблюдается рост прессовок. Это вызвано тем, что при спекании происходит гомогенизация сплава и в результате униполярной диффузии может наблюдаться рост заготовок вследствие образования пор. Поэтому изучались закономерности уплотнения смесей предполагаемых составов разрабатываемого материала.

Так при изучении уплотняемости исходного состава сплава ниобия установлено, что частичная замена титана его аналогом цирконием приводит к росту плотности, во всем диапазоне давлений прессования начиная от границы

формуемости, что обусловлено большей пластичностью порошка циркония. Сопоставляя предыдущие данные по уплотняемости ниобия можно заключить, что добавки остальных компонентов в тех заданных количествах не влияют существенно на характер уплотнения, однако увеличивают величину давления, соответствующего нижней границы формуемости.

В пределах варьирования состава основных компонентов и содержания различных добавок не происходит существенного изменения уплотняемости смесей на основе ниобия. Это обусловлено высоким запасом пластичности порошка ниобия. Поэтому имеется достаточно большой интервал варьирования легирующих добавок при оптимизации состава материала. При этом следует отметить, что принципиальных отличий от общих закономерностей при формовании порошковых композиций на основе ниобия не наблюдается в рамках классических представлений, развитых в работах М.И. Бальшина, И.Д. Радомысельского, М.Б. Штерна и других.

4. Закономерности процессов спекания порошковых композиций на основе ниобия

При помещении образцов в нагретую печь и иницировании реакционного взаимодействия и до его окончания, процесс спекания идет в неизотермическом режиме, при котором траектория изменения температуры определяется не только собственно внешним теплом, но и внутренним тепловыделением (рис.3).

Следует отметить, что на стадии самообострения реакционного взаимодействия наблюдается нелинейный характер изменения температуры, что подтверждает синергетическую природу реакционного взаимодействия.

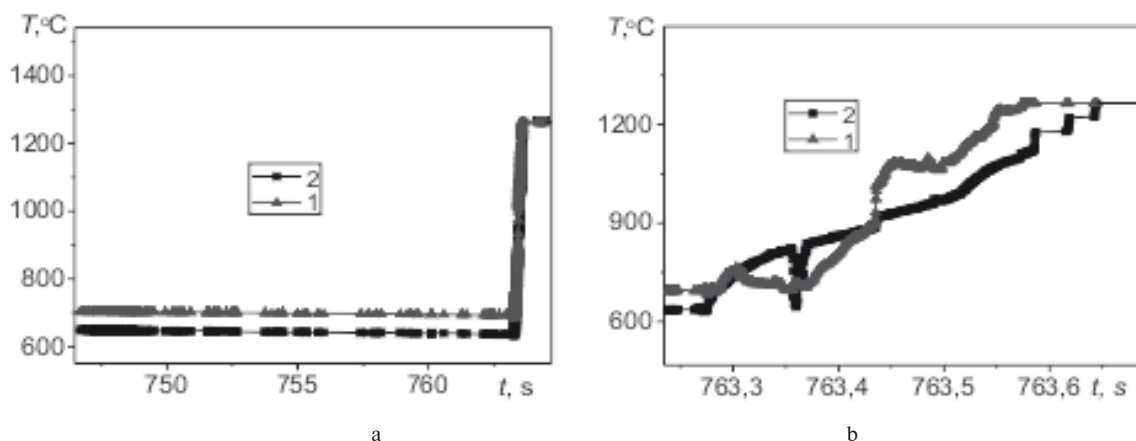


Рис. 3. Термокинетика реакционного взаимодействия в системе Nb-Al: а – общий вид, б – фрагмент показания термопар, установленных по длине образца: 1 – 2 мм, 2 – 6 мм

В соответствии с заданием плотность материала на основе ниобия должна составлять не более 6 г/см^3 , что накладывает определенные ограничения на интервалы концентраций основных легирующих компонентов, ответственных за такие свойства как жаропрочность, жаростойкость, а также плотность конечного продукта. Собственно, для этого были построены зависимости теоретической плотности тройных сплавов от содержания основных легирующих компонентов сплава – титана и алюминия (рис. 4).

Представленные результаты позволяют определить диапазоны варьирования содержания титана и алюминия.

Именно при спекании формируется необходимый комплекс свойств порошкового функционального материала. Происходит диффузионная гомогенизация, образуются межчастичные контакты, формируется структура материала и прочие процессы. Исходя из состава сплава по основным легирующим компонентам, нельзя однозначно установить технологическое поведение при спекании. Ниобий с титаном образует непрерывный ряд твердых растворов.

Однако в связи с увеличением или уменьшением концентрации титана и соответственно гомологической температуры солидуса также изменяются параметры гетеродиффузии, что так или иначе будет влиять на характер объемных изменений бинарных сплавов. Действительно изучение закономерностей уплотнения при спекании свидетельствует, что с увеличением содержания титана в бинарном сплаве наблюдается увеличение усадки при малых плотностях заготовки.

Так при спекании сплава ниобия с 30 % титана усадка наблюдается только при малой относительной плотности прессовок, что обусловлено наличием достаточно развитой вну-

тренней поверхностью пористого тела. Однако с повышением плотности прессовок более 77,5% вследствие гетеродиффузии компонентов подавляется усадка и наблюдается рост образцов.

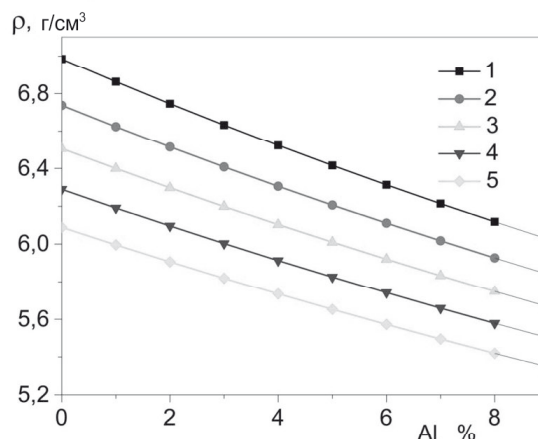


Рис. 4. Зависимость теоретической плотности сплавов ниобия от содержания титана и алюминия: 1 – 25% Ti; 2 – 30% Ti; 3 – 35% Ti; 4 – 40% Ti; 5 – 45% Ti. Здесь ρ – плотность; Al – содержание алюминия

Повышение содержания титана до 35 % способствует расширению области наблюдаемой усадки вплоть до образцов с пористостью 87,5 %. При дальнейшем повышении плотности сырых прессовок гетеродиффузия компонентов снова начинает подавлять усадку, что опять-таки приводит к росту образцов. То есть, при данном содержании титана рост образцов возможен лишь при большой относительной плотности прессовок, которая достигается при давлениях прессования, близких к граничным возможностям стандартных пресс-форм, используемых в технологическом процессе получения материала.

Увеличение же содержания титана в сплаве до 45 % приводит к усадке во всем диапазоне относительных плотностей сырых прессовок,

получаемых при данном технологическом процессе. Также следует отметить, что увеличение содержания титана в сплаве приводит не только к качественному изменению процесса роста на процесс усадки, но и значительно увеличивает усадку количественно. Так, при увеличении содержания титана с 30 до 45 % максимальная наблюдаемая усадка изменяется от 4,7 до 18%. Таким образом, прослеживается четкая зависимость между количеством титана в сплаве и величиной усадки.

Алюминий для данной системы является реакционным компонентом, поскольку как в системе титан-алюминий, так и в системе ниобий-алюминий имеются несколько промежуточных фаз. При спекании могут включаться принципиально новые механизмы массопереноса. Как это было показано [3], процесс реакционного взаимодействия начинается с плавления наиболее легкоплавкого компонента, в данном случае алюминия. Естественно, скорость растворения тугоплавких компонентов в жидком расплаве значительно превышает ее при растворении твердых компонентов в тугоплавкой основе. Поэтому введение алюминия приводит к резкому увеличению роста прессовок и соответственно пористости образцов. В связи с этим возникают проблемы повышения плотности заготовок. Поскольку для дополнительного уплотнения необходима уже другая прессформа с большими размерами, чтобы можно было вставить образец. Кроме того, вследствие реакционной диффузии происходит ускоренная гомогенизация и соответственно

происходит упрочнение материала, поэтому уже необходимо использовать для повторного прессования значительно большие давления, а в случае с данным сплавом за пределом прочности стальных пресс-форм.

Вследствие установления механизма роста при реакционном спекании был разработан новый метод активации спекания [7]. При реакционном спекании в реакционной жидкости генерируется большое количество мелких пор, которые быстро коагулируют в большие каверны, не устраняемые при спекании. В реакционной жидкости возникает большое количество локальных потоков, которые способствуют коагуляции мелких пор. Введение наноразмерных порошков инертной добавки, например, фторидов или оксидов при определенном соотношении приводит к расщеплению и торможению образования каверн. Рост наблюдается на начальной стадии, когда образуются мелкие поры. Затем они эффективно участвуют в активации спекания композиции. Таким образом, было найдено соответствующее отношение количества инертной добавки оксида иттрия и реакционного компонента, что привело к уплотнению всей композиции (рис. 5).

В данном случае процесс уплотнения практически не отличается от характера спекания однокомпонентных металлических порошков, т. е. соответствует закономерностям, свойственным феноменологической модели спекания [7]. Для нее характерно увеличение величины усадки от пористости заготовок или уменьшения их относительной плотности.

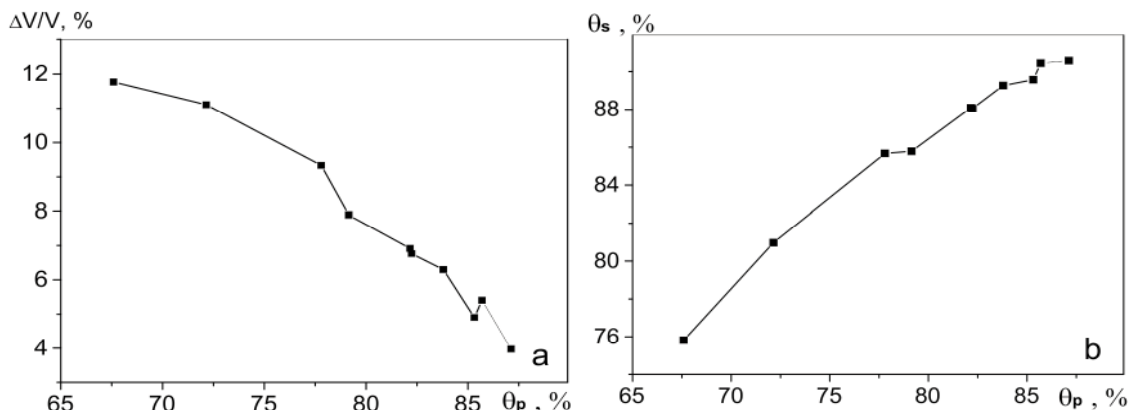


Рис. 5. Зависимость усадки образцов (а) и их относительной плотности (б) при температуре спекания 1325 °С от относительной плотности прессовок композиции на основе ниобия с 37% Тi, содержащего алюминий и оксид иттрия. Здесь $\Delta V/V$ – усадка образцов; θ_s – относительная плотность сырых прессовок

От величины относительной плотности зависит и величина потерь массы, связанная с выделением адсорбированных газов кислорода, азота углекислого газа и воды. Все они относятся к примесям внедрения, которые по-

нижают пластичность металлов VA группы и их сплавов. Действительно изучение зависимости потерь массы при спекании показало существенное их содержание. Так при относительной плотности прессовок около 67 % потери

составляют немногим более 1 %, в то время как при относительной плотности более 70 % они уже около 2 %. Это значит, что большая часть примесей внедрения остается в составе материала.

При выборе оптимальной технологии необходимо знать не только о величине усадки, но и о значении относительной плотности, которая достигается при заданных параметрах технологического процесса. Так наличие пористости менее 90 % предполагает существование открытой пористости, а это значит при последующей горячей прокатке необходимо применение защитных сред во избежание внутреннего окисления. Это значительно удорожает технологию. На примере разрабатываемого сплава данного состава видно, что несмотря на большую усадку при малых плотностях достигается только в области больших плотностей прессовки. Это достигается применением максимальных усилий формования, а это выдвигает особые требования к материалам стальных пресс-форм, применяемых при холодном формовании заготовок материала. Наиболее целесообразно использование уже не просто углеродистых сталей типа У8, а, по крайней мере, легированных инструментальных сталей типа ХВГ. Срок их службы будет значительно выше.

Рентгенофазовый анализ спеченного сплава на основе ниобия при разных температурах показал достаточно хорошую гомогенизацию сплава [5]. Однако при таком составе сплав попадает в двухфазную область, и наблюдаются линии интерметаллидов. Не исключено, что в процессе реакционного взаимодействия образуются устойчивые структуры интерметаллидов, окруженные оксидами титана, как это наблюдается на рентгенограмме (рис. 6).

Действительно, видны рефлексы низших оксидов титана, в частности Ti_2O . Повышение температуры спекания до 1375 °С приводит к исчезновению интерметаллидов титана, однако, оксид титана Ti_2O сохраняется. Следует обратить внимание на уширение линий интерметаллидов, что связано с неравновесным характером их образования. Вероятно, они являются первичным продуктом реакционного спекания, т. е. синтезируются в начальный период экзотермической реакции, инициированной контактным плавлением алюминия в порошковой смеси.

Анализируя изломы и характер разрушения такого состава материала можно сделать заключение, что сплав весьма хрупок и имеет невысокую пластичность.

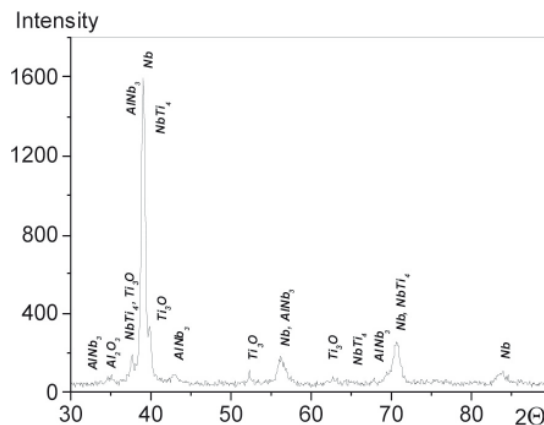


Рис.6. Рентгенограммы фазового состава сплава на основе ниобия, спеченного при 1375 °С в течение часа

Учитывая эти обстоятельства, был разработан новый материал на основе ниобия с большим содержанием титана. Исследование уплотняемости смеси при холодном формовании показало, что увеличение содержания титана приводит к снижению плотности прессовок. В тоже время изучение процесса спекания этой композиции показало, что при увеличении концентрации титана всего лишь на 8 % происходит существенное увеличение усадки. Величина усадки растет практически в два раза во всем диапазоне изменения относительной плотности прессовок. Однократным спеканием достигается необходимая плотность заготовок более 90 %. Поэтому уже нет необходимости вводить операцию допрессовки заготовок.

Увеличение содержание титана приводит к повышению пластичности материала, что позволяет увеличить объемную долю инертной дисперсно-упрочняющей добавки оксида иттрия и тем самым увеличить жаропрочность сплава.

5. Исследование жаростойкости и физико-механических свойств материала

Исследована циклическая жаростойкость ниобиевых сплавов плотностью 5,788 г/см³ и 5,558 г/см³. Эксперименты проводилось на цилиндрических образцах диаметром 1,994; 0,992 и высотой 0,294; 0,481 см для сплавов ниобия плотностью 5,788 г/см³ и 5,558 г/см³, соответственно. На протяжении исследования было проведено 100 двадцатиминутных циклов окисления образцов в электрической печи при температуре 1200 °С.

После каждого 20-минутного цикла проводилось взвешивание остывших до комнатной температуры образцов на аналитических электронных весах с точностью до одной десятитысячной грамма. Сплав с меньшим содержанием титана менее жаростоек (рис. 7), чем сплав, содержащий 45 % Ti.

Результаты экспериментов показали, что при первых нескольких циклах окисления наблюдается небольшой привес, который не превышает 1 % для ниобия плотностью 5,788 г/см³ и 0,3 % для ниобия плотностью 5,558 г/см³ за первый цикл и значительно уменьшается с каждым последующим циклом. Привес напрямую связан с образованием стойкой оксидной пленки на поверхности материала. Начиная с 6 цикла для

более плотного сплава на основе ниобия и с 17 цикла для менее плотного, наблюдается незначительная потеря веса образцов, что можно объяснить незначительным отшелушиванием части оксидной пленки, которое практически равномерно продолжается вплоть до 100-го цикла окисления (рис. 7).

Изучение термокинетики процесса окисления свидетельствует, что сплав с меньшим

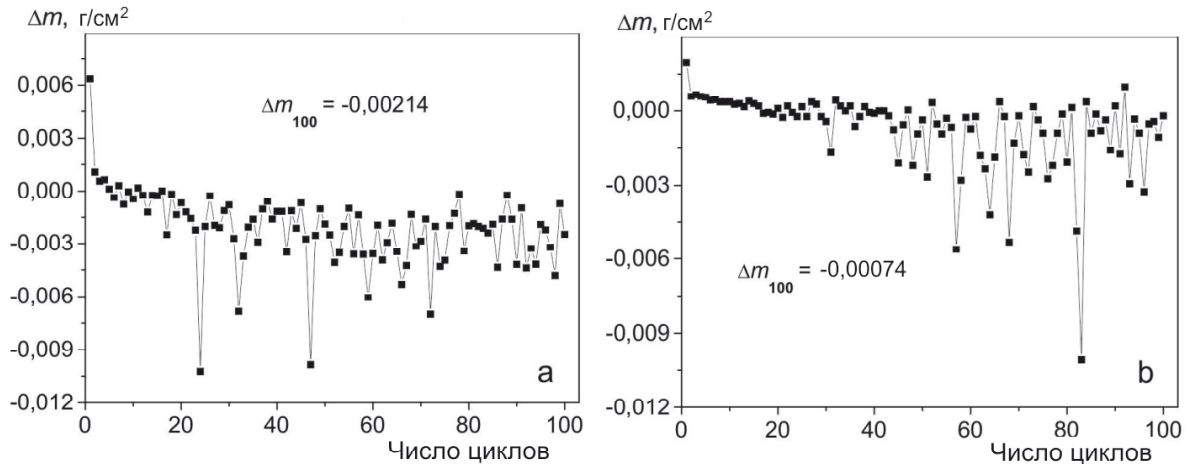


Рис. 7. Циклическая жаростойкость при температуре 1200 °С дисперсно-упрочненных ниобиевых сплавов с плотностью = 5,788 г/см³ (а) и = 5,558 г/см³ (б), разработанных с применением реакционного спекания

содержанием титана окисляется в условиях больших термокинетических колебаниях, чем композиция на основе ниобия оптимального состава, что, собственно, и подтверждает гипотезу о важной роли динамики

окисления [8] на формировании жаростойкой композиции и выбора его оптимального состава (рис. 8).

В таблице приведены физико-механические свойства разработанного сплава на основе нио-

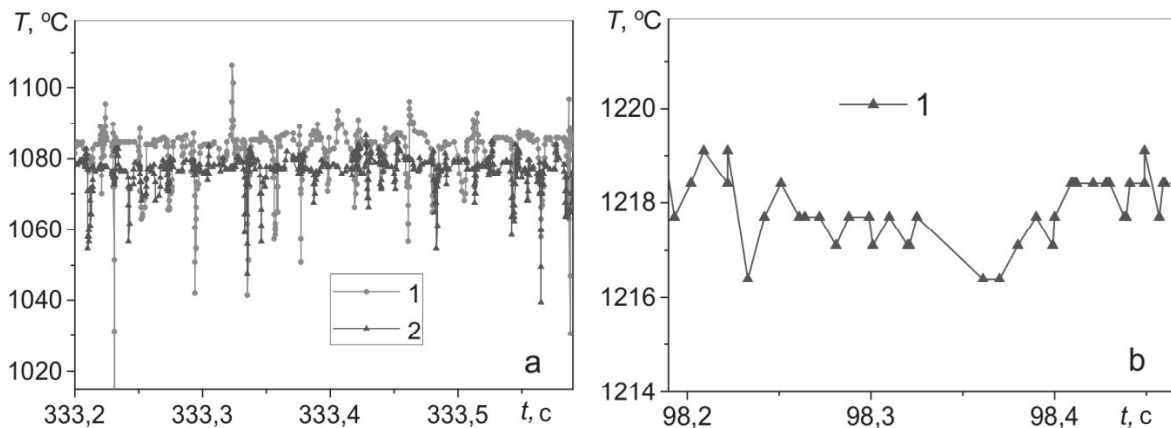


Рис. 8. Термокинетика окисления ниобиевых материалов: а – 37 % Ti, б – 45 % Ti; 1 и 2 – показания термопар, установленных на поверхности и в глубине от нее на 2 мм, соответственно

бия. Материал испытывался после спекания при относительной плотности 92,5 %.

Результаты испытаний свидетельствуют о достаточно высоких характеристиках материа-

ла, способного работать в требуемых условиях без защитных покрытий. Он может применяться для металлической тепловой защиты многоразовых космических аппаратов.

Таблица
Физико-механические свойства сплава на
основе ниобия оптимального состава

Плотность, ρ	г/см ³	5,558
Прочность на разрыв, $\sigma_B^{20^*}$	МПа	900-1000
Прочность на разрыв, $\sigma_B^{1100^*}$	МПа	80-110
Удлинение при 20 °С, %	%	18-25
Прочность на разрыв, $\sigma_B^{1200^*}$	МПа	55-60

*) – значение температуры в °С

Заключение

Разработан новый жаростойкий дисперсно-упрочненный сплав на основе ниобия с пониженной плотностью 5,558 г/см³, который существенно легче металлических сплавов, применяемых для тепловой защиты многоразовых МКС.

Реализована технология реакционного спекания материала на основе ниобия.

Исследована жаростойкость сплава. Установлено, что материал пригоден для работы в условиях циклического воздействия температуры до 1200 °С, так как выдержал 100 циклов нагрева и охлаждения до комнатных температур. За весь период испытаний материал потерял 11 % массы.

Литература

1. Математическое моделирование сильно неравновесных топохимических реакций в порошковых системах [Текст] / В. П. Солнцев, В. В. Скороход, В. Л. Баранов [и др.] // Порошковая металлургия. 2001. №5/6. С. 203-207.

2. Солнцев В. П. Модель автоколебательной топохимической реакции в открытой системе металл - двухатомный газ [Текст] / В. П. Солнцев, В. В. Скороход, В. Л. Баранов // Доповіді НАН України. 2001. №12. С. 8387.

3. Солнцев В. П. Коллективные процессы при реакционном спекании с участием жидкой фазы / В. П. Солнцев, В. В. Скороход, Т. А. Солнцева // Порошковая металлургия. 2010. №3/4. С. 2229.

4. Солнцев В. П. Физико-химические основы формирования диссипативных структур при реакционном спекании и сухом трении материалов, содержащих селениды переходных металлов [Текст] : автореф. дисс д-ра техн. наук / В. П. Солнцев ; Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. – К., 2013. – 44 с.

5. Термокинетика начальной стадии контактного плавления в перитектических системах с химическим соединением [Текст] / В. П. Солнцев, В. В. Скороход, К. М. Петраш [и др.] // Современные проблемы физического материаловедения. 2013. № 22. С. 181-185.

6. Полежаев Ю. В. Тепловое разрушение материалов [Текст] / Ю. В. Полежаев, Г. А. Фролов; под ред. академика НАН Украины В. В. Скорохода. 2006. К. : Академперіодика. 354 с.

7. Solntsev V. P. Features of Reacting sintering of compositions containing refractory inert components [Text] / V. P. Solntsev, V. V. Skorokhod, T. A. Solntseva // Материаловедение тугоплавких соединений : сб. науч. тр. IV Междунар. конф. К.: НАНУ, 2014 – С. 37.

8. Математичне моделювання процесу окиснення та розкладу заліза в умовах термічної нестійкості оксиду FeO [Текст] / В. П. Солнцев, В. В. Скороход, В. С. Маслікевич [та ін.] // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении : зб. наук. пр. Інститута проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича НАН України. – К., 2015. – Вип. 17. С. 37-40.

Поступила в редакцію 17.05 2016

В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Г.А. Фролов, К.М. Петраш, Т.А. Солнцева, А.М. Потапов, И.А. Гусарова. Розробка жароміцного сплаву на основі ніобію для теплового захисту виробів ракетно-космічної техніки

Велика частина поверхні багаторазових космічних систем типу «Шаттл» і «Буран» була захищена суперлегким плитковим захистом з волокна на основі кварцових волокон. Однак ці плитки мали низькі механічні характеристики і часто руйнувалися під впливом випадкових механічних ударів. В зв'язку з цим було розроблено новий жаростійкий дисперсно-зміцнений сплав на основі ніобію зі зниженою щільністю (до 6000 кг/м³), який істотно легше металевих сплавів, що на цей час застосовуються для теплового захисту багаторазових космічних систем. Проведено механічні випробування сплаву на розрив при температурах до 1200 °С. В процесі термоцикування (нагрів до 1200 °С і охолодження до кімнатної температури) показано, що розроблений сплав за 100 циклів по 20 хвилин дав зменшення маси 0,00074 г/см².

Ключові слова: дисперсно-зміцнений сплав, ніобій, термоцикування, термокінетика, жаростійкість, фізико-механічні характеристики.

V.P. Solntcev, V.V. Skorokhod, G.A. Frolov, K.N. Petrash, T.A. Solntceva, A.M. Potapov, I.A. Gusarova. Development of the hot-strength alloy based niobium for thermal protection of rocket and space technology products

Most of the surface of the reusable space systems of the type “Shuttle” and “Buran” was protected super light tiled protection of the fiber based on silica fibers. However, these tiles have low mechanical properties and are often destroyed by accidental mechanical shock. In this regard, the new heat-dispersion-strengthened alloy of niobium-based with low density (up to 6000 kg/m³), which is significantly lighter than metal alloys currently used for thermal protection of reusable space systems. Conducted alloy tensile test at temperatures up to 1200 °C. During thermocycling (heating to 1200 °C and cooling to room temperature), it is shown that the alloy developed for 100 cycles of 20 minutes gave a weight gain of 0.00074 g/cm².

Key words: *dispersion-strengthened alloy, niobium, thermocycling, thermokinetics, heat resistance, physical and mechanical properties.*