



УДК 669.187.826

ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

В. А. Березос, Н. П. Тригуб

Представлены результаты экспериментальных исследований по получению сплава на основе титана TiNi способом электронно-лучевой плавки.

Results of experimental investigations on producing alloy on TiNi alloy base using electron beam melting are presented.

Ключевые слова: сплав TiNi; электронно-лучевая плавка; слиток

В последнее десятилетие широко применяются сплавы с эффектом памяти формы, которые дают возможность реализовать служебные характеристики конструкций и устройств, недостижимые при использовании других материалов. Они имеют широкий диапазон применения в зависимости от температуры мартенситного превращения и механических свойств. Их используют в ядерной энергетике, машиностроении, авиакосмической и бытовой технике, приборостроении, спецмашиностроении и др. [1–6]. Как показывает накопленный мировой опыт, особенно перспективной областью применения сплавов с памятью формы является медицинская техника [7].

В настоящее время существует более десятка сплавов с эффектом памяти формы на базе разных элементов — TiNi, TiNb, PtTi и др. [8]. Однако самым известным и практически значимым является сплав TiNi — нитинол — с четко выраженным эффектом памяти формы, диапазон температур которого можно регулировать с хорошей точностью путем введения в сплав различных примесей. Применение нитинола обусловлено редким для сплавов такого типа сочетанием высоких конструкционных, технологических и функциональных свойств памяти формы и сверхпластичности. Они имеют хорошие эластичные свойства, способны изменять фор-

му при варьировании температуры и не разрушаться в условиях знакопеременной нагрузки. Сплав характеризуется хорошими характеристиками формозапоминания, имеет большую прочность при более низком модуле упругости, чем у нержавеющей стали, а также отличается высокими уровнями демпфирующей способности материала и коррозионной стойкости.

Проведенные исследования показали, что эти сплавы не токсичны, не оказывают канцерогенного действия на окружающие ткани, имеют высокие показатели коррозионной стойкости в тканях живого организма и биологической совместимости, благодаря чему применяются в медицине в качестве имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов [7].

Однако использование любого конструкционного материала зависит не только от его физико-механических свойств, но и от таких характеристик, как технологичность, дефицитность и стоимость. Сложность металлургического производства сплавов TiNi также является сдерживающим фактором для их широкого распространения. Для получения полуфабрикатов с гарантированными температурами срабатывания требуется применение дорогостоящего оборудования. А это приводит к высокой стоимости изделий.

Традиционно для получения сплавов TiNi является обязательным применение многоступенчатого



Рис. 1. Электронно-лучевая установка УЭ-208М

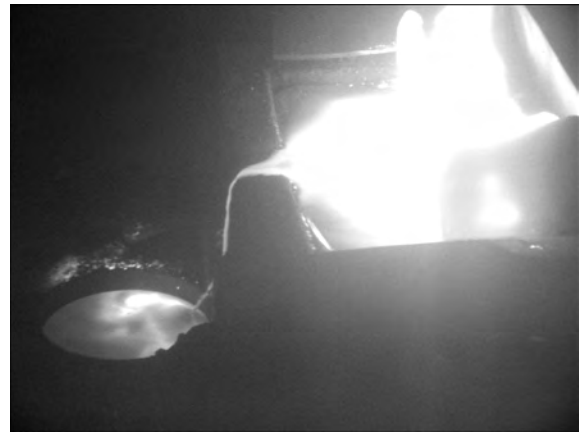


Рис. 2. Процесс плавки сплава TiNi

технологического процесса [8]. При наличии в сплаве титана, который легко присоединяет азот и кислород, необходимым условием при производстве является использование вакуумного оборудования либо защитной атмосферы (гелий или аргон).

Для получения высококачественного сплава с хорошими механическими свойствами требуется тщательный подбор первичных компонентов. Шихтой, как правило, служит йодидный титан или титановая губка, спрессованная в брикеты, а также никель марки Н-0 или Н-1.

С целью получения равномерного химического состава по сечению и высоте слитка проводят двойной или тройной переплав. Выплавку сплавов TiNi осуществляют с использованием вакуумно-индукционного и дугового способов [8]. Исходный слиток готовят в графитовых печах способом вакуумной индукционной плавки. Это позволяет достаточно просто получать хорошо смешанный сплав. Затем для улучшения химического состава, структуры и однородности производят переплав в вакуумной дуговой печи с расходуемым электродом.

Материалы с эффектом памяти формы при большом содержании титана относят к химически агрессивным расплавам. Они показывают высокую степень смачивания и полное растекание расплавов по поверхности стандартных огнеупоров (оксидов, карбидов, нитридов, графита и др.). Возможно проникновение расплава в трещины и поры тигля из огнеупорного материала, его разъедание и разрушение, и, как следствие, — насыщение и загрязнение сплава продуктами взаимодействия с элементами материала тигля, в частности кислородом, углеродом, азотом, с образованием оксидов, нитридов, карбидов титана, что вызвано большим химическим сродством этого металла к кислороду, азоту, углероду [8].

Примеси, попадающие в сплав в результате взаимодействия с тиглем, сильно влияют на качество сплава TiNi. Даже небольшие изменения в пропорциях компонентов приводят к колебанию температур мартенситного превращения. Такие загрязненные сплавы не только меняют температуру мартенситного превращения, но и могут совсем утратить возможность к последнему [9].

Таким образом, получение сплавов TiNi высокого качества не сводится к простой выплавке металлов и может быть отнесено в разряд «высоких» технологий.

Получение полуфабрикатов на основе сплавов TiNi с требуемым химическим составом и уровнем механических свойств возможно всего в нескольких странах [10].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен огромный опыт в области выплавки слитков интерметаллидов титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью [11].

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью отличается высокой степенью рафинирующей способности. Получению гарантированного химического состава в узком интервале концентраций с обеспечением необходимой химической однородности в слитках при выплавке сплавов способствует применение промежуточной емкости.

Цель работы заключалась в проведении исследований и разработке технологии получения слитков Ti-46 % Ni-54 % при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью.

Опытные плавки слитков диаметром 165 мм сплава TiNi выполняли на установке УЭ-208М (рис. 1).

Установка позволяет выплавлять слитки круглого сечения диаметром до 300 мм, длиной до 2000 мм, а также слитки прямоугольного сечения 450×145 мм, длиной до 1500 мм.

В качестве шихтовых материалов использовали листы титанового сплава BT1-0 и пластины катодного никеля марки Н-1. Поскольку титан и никель имеют близкие значения температуры плавления (соответственно 1645 и 1455 °С), а также упругости паров при температурах плавления, применили способ, при котором шихту в нужном процентном соотношении укладывали вперемешку в расходуемый титановый короб. После загрузки шихты установку вакуумировали. Вначале шихту сплавляли в промежуточную емкость, а затем жидкий металл периодически сливали в медный водоохлаждаемый кристаллизатор до получения слитка необходимой длины (рис. 2).



Рис. 3. Слиток сплава TiNi



Рис. 4. Дефектоскоп ультразвуковой УД4-76

В конце плавки производили вывод усадочной раковины, затем слиток охлаждали в условиях вакуума до полного остывания.

На рис. 3 представлен выплавленный слиток сплава TiNi.

Для выявления в полученном слитке внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали способ ультразвуковой дефектоскопии. Исследования проводили эхо-импульсным способом при контактном варианте контроля при помощи прибора УД4-76 (рис. 4).

Пор, несплошностей и дефектов усадочного характера в слитке не обнаружено.

Методом химического анализа изучали состав сплава TiNi. Отбор проб производили вдоль слитка

на глубине 5 мм от поверхности, а в радиальном направлении (поперек слитка) — на радиусах 70, 50 и 30 мм. Исследовали три зоны — верхнюю, нижнюю и середину слитка. Результаты химического анализа сплава TiNi показали, что отклонение содержания элементов в слитке как по длине, так и по поперечному сечению не превышает 0,2 %, что является удовлетворительным результатом [12].

Таким образом, разработанная технология и опытные плавки слитков сплава TiNi способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью показали перспективность использования последнего с целью получения качественных слитков TiNi для нужд отечественной промышленности и медицины. Создание данной технологии позволяет причислить Украину к немногим странам, способным получать такой сплав.

1. Зеленов Б. А., Крылов Б. С., Лихачев В. А. Сплавы с управляемыми функциональными свойствами — прототип интеллектуальных материалов // *Материалы с эффектом памяти формы*: Сб. тр. — Санкт-Петербург, 1995. — Ч. III. — С. 55–58.
2. Ионайтис Р. Р., Котов В. В., Туктэров М. А. Использование сплавов с памятью формы в ядерной энергетике // *Там же*. — 1995. — Ч. II. — С. 133–134.
3. Рыклина Е. П., Морозова Т. В., Прокошкин С. Д. Биомедицинская инженерия в создании и применении нитиноловых эндопротезов с эффектом памяти формы // *Там же*. — 1995. — Ч. II. — С. 51–54.
4. *Перспективы применения сплавов с эффектом памяти формы в робототехнике* / В. А. Лихачев, В. А. Лопота, Ю. К. Степанов, В. И. Юдин // *Там же*. — 1995. — Ч. III. — С. 59–61.
5. Воронков А. В., Лихачев В. А. Исследование никелида титана в качестве рабочего тела управляемых демпферов // *Там же*. — Ч. I. — 1995. — С. 83.
6. *The use of shape memory alloys in space building* / Yu. D. Kravchenko, V. A. Lichachev, A. I. Razov et al. // *Там же*. — 1995. — Ч. I. — С. 58–61.
7. *Никелид титана. Медицинский материал нового поколения* / В. Э. Гюнтер, В. Н. Ходоренко, Ю. Ф. Ясенчук и др. — Томск: МИЦ, 2006. — 296 с.
8. Красовський П. Дослідження капілярних характеристик та плавка сплаву нікель-титан (NiTiNOL) з ефектом пам'яті форми // *Адгезія расплавов и пайка матеріалов*. — 2009. — Вып. 42. — С. 95–102.
9. Anokhin S. V., Lotkov A. I., Grishkov V. N. The substitution impurity influence on the succession and temperatures of martensitic transformations in TiNi // *Материалы с эффектом памяти формы*: Сб. тр. — Санкт-Петербург, 1995. — Ч. I. — С. 29–33.
10. *Развитие научно-технических решений в медицине* / В. Н. Канюков, Н. Г. Терегулов, В. Ф. Винярский, В. В. Осипов: Учеб. пособие. — Оренбург, ОГУ, 2008. — 255 с.
11. Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н. Получение слитков γ -алюминиды титана методом ЭЛПЕ // *Современ. электрометаллургия*. — 2003. — № 4. — С. 20–22.
12. *Основы плавки титана и сплавов на его основе в установке с холодным тиглем* / А. В. Александров, Е. А. Афонин, С. А. Делло и др. // *Титан*. — 2010. — № 2. — С. 36–41.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 20.04.2011