



УДК 669.187.56.001.3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКИ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НИКЕЛИДА ТИТАНА

И. В. Протокилов, И. А. Скиба, Д. А. Петров

Представлены результаты исследований по получению способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки сплавов с эффектом памяти формы на основе никелида титана, и их последующей термомеханической обработки.

Presented are the results of investigations for producing memory-shaped alloys on titanium nickelide base by the method of magnetically-controlled electroslag melting and their subsequent thermomechanical treatment.

Ключевые слова: магнитоуправляемая электрошлаковая плавка; никелид титана; слиток; термомеханическая обработка; деформация; проволока

Сплавы на основе никелида титана (Ti–53,5... 57,0 Ni мас. %) являются функциональными материалами, характеризующимся уникальными свойствами — эффектом памяти формы и сверхупругостью, — которые в сочетании с высокими значениями прочности и коррозионной стойкости, низким уровнем плотности, высокой биологической совместимостью и низким модулем упругости обуславливают эффективность его использования при изготовлении медицинских инструментов и имплантатов, термочувствительных датчиков, различных термомеханических устройств, соединительных муфт и пр. [1–3].

Производство никелида титана сопряжено с проблемой обеспечения строго заданного состава металла, а также химической и структурной однородности. Это вызвано тем, что комплекс его рабочих характеристик, прежде всего температуры начала и конца восстановления формы, определяемые температурами прямого и обратного мартенситного превращений фазы B2, существенно зависит от химического и фазового состава сплава. Для большинства изделий значения температуры восстановления формы должны соблюдаться с точностью до ± 10 °C, а в некоторых случаях, например для термочувствительных датчиков и изделий медицинского назначения, — до ± 1 °C [2].

Таким образом, к сплавам на основе TiNi предъявляются высокие требования к точности состава (погрешность до 0,2... 0,3 %) и их химической однородности, что в свою очередь диктует необхо-

димость применения сложного многоступенчатого технологического процесса для получения никелида титана. При этом произведенные слитки и полуфабрикаты подвергаются полному тестированию и отбирают только небольшую часть от партии с требуемыми характеристиками, что, как следствие, сказывается на цене готового металла (свыше 800 дол. США за кг) [2].

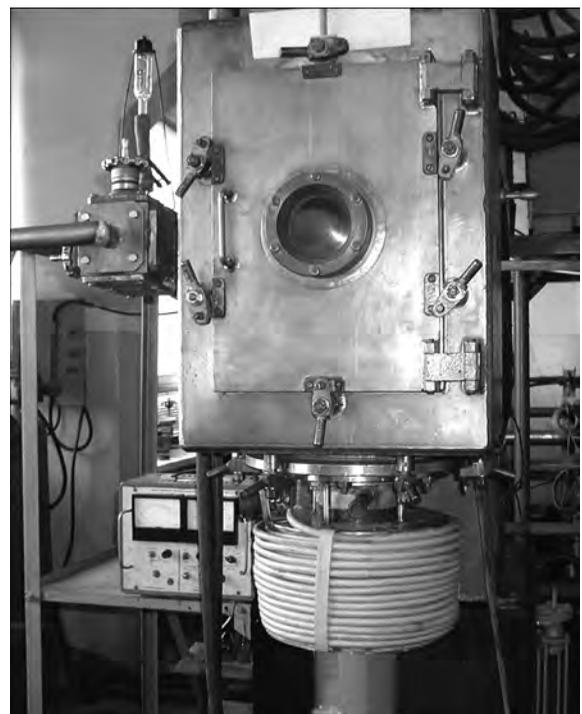


Рис. 1. Внешний вид установки для МЭП титановых сплавов

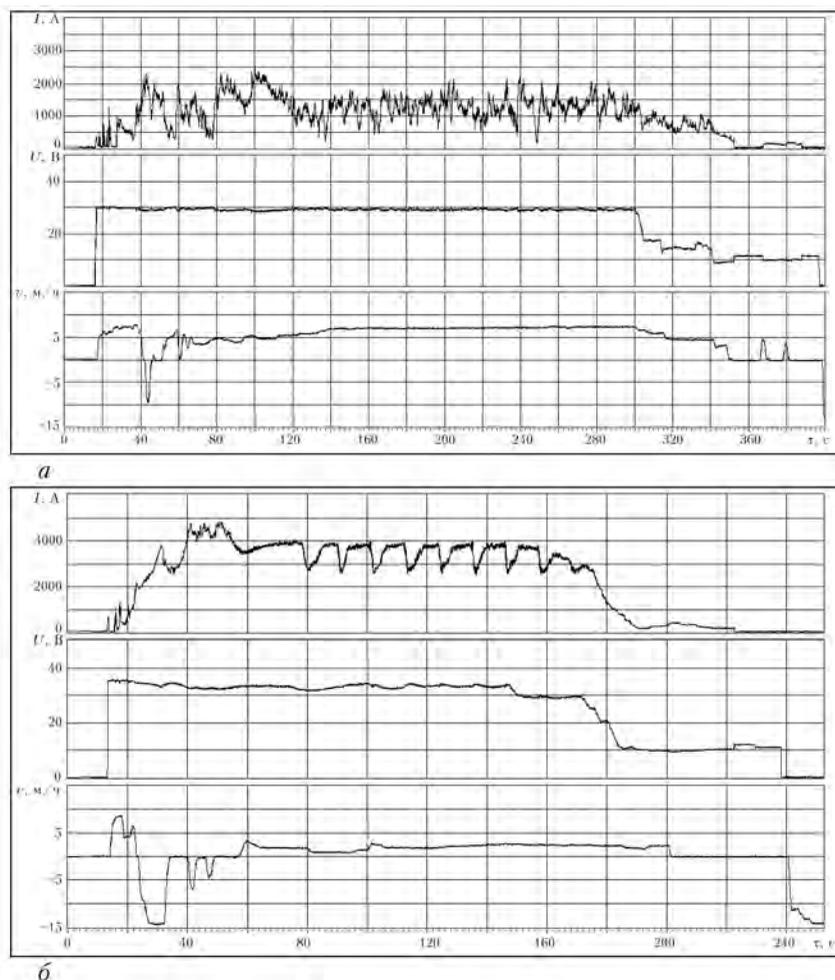


Рис. 2. Регистрограммы режимов МЭП никелида титана при первом (а) и втором (б) переплавах

В настоящее время для производства сплавов на основе никелида титана используют преимущественно способы вакуумно-дугового перепада с расходующим и нерасходующим электродами [2, 4] или индукционной плавки в графитовом или холодном тигле [5–7]. Для повышения гомогенности металла применяют многоразовый перепад (в некоторых случаях до трех, четырех раз). Исследуются возможности получения слитков никелида титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью [8].

Несмотря на интенсивные работы по выплавке сплавов системы TiNi задача обеспечения химической и структурной однородности при их производстве остается чрезвычайно актуальной. Очевидно, что для

гарантированного воспроизведения заданных характеристик никелида титана необходимо использование дополнительных средств воздействия на однородность металла.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании процесса выплавки слитков никелида титана способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) [9, 10] и их последующей термомеханической обработки для получения полуфабрикатов в виде пластин и проволоки.

Основным отличительным признаком процесса МЭП является электромагнитное воздействие на металлургическую ванну, что позволяет получать сплавы с химической однородностью металла и мелкозернистой структурой [9, 10].

Процесс МЭП осуществляется в электрошлаковой печи камерного типа в контролируемой атмосфере инертного газа, что сводит к минимуму взаимодействие металла с атмосферными газами (рис. 1). Плавку выполняют в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. При этом наличие шлакового гарнисажа между жидкометаллической ванной и стенкой кристаллизатора минимизирует контакт расплава с материалом кристаллизатора, а также возможность загрязнения выплаваемого металла. При электрошлаковом процессе отсутствует испарение легирующих компонентов, в результате чего создаются предпосылки для точного «попадания» в заданный химический состав сплава. Указанные особенности процесса МЭП обуславливают перспективность его применения для получения слитков никелида титана.

Способом МЭП выплавляли слитки никелида титана Ti–55Ni (мас. %) диаметрами 60, 80 и 100 мм. Исходными компонентами служили титан губчатый ТГ-90 (фракция –30 +10 мм) и никель полуфабрикатный НП-2 в виде обрезки фольги толщиной 0,3 мм. Расходуемые электроды изготовляли способом прессования исходных компонентов в трубу из спла-

Таблица 1. Параметры процесса МЭП никелида титана

№ перепада	Тип электрода	Диаметр, мм		$U_{пл}, В$	$I_{пл}, А$	Продолжительность действия магнитного поля, с		$B, Тл$
		электрода	слитка			импульса	паузы	
1	Прессованный	38	62	30	1200	–	–	–
2	Литой	62	84	34	4000	1	10	0,14
2	»	62	100	36	4200	2	10	0,25



ва ВТ1 диаметром 38 мм, длиной 800 мм. С помощью обечайки из титановой трубы обеспечивали дополнительную прочность и электропроводность расходного электрода. Для наведения шлаковой ванны использовали безкислородный флюс АН-Т4. Полученные слитки подвергали повторному переплаву, что связано с особенностями плавления пресованного электрода, характеризующегося существенными колебаниями тока плавки (рис. 2, а).

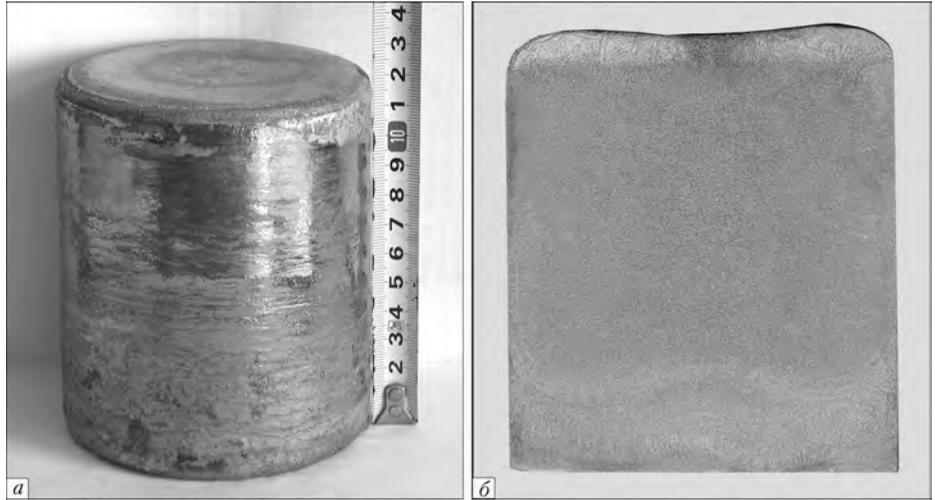


Рис. 3. Внешний вид (а) и продольное сечение (б) слитка Ti-55Ni (мас. %) диаметром 100 мм

Задача электромагнитного воздействия при повторном переплаве заключалась в гомогенизации химического состава металла и измельчении его кристаллической структуры посредством импульсного воздействия продольным магнитным полем. В данном случае в металлургической ванне создаются азимутальные (вокруг оси симметрии) течения расплава и электромагнитная вибрация, усиленная гидродинамическими ударами при включении импульсов магнитного поля [9-10].

Режимы плавки представлены в табл. 1 и на рис. 2. Внешний вид и макроструктура продольного сечения слитка второго переплава показаны на рис. 3. Слиток характеризуется высоким качеством формирования боковой поверхности, отсутствием дефектов и трещин (рис. 3, а). При анализе макроструктуры продольного сечения слитка включения различного характера не обнаружены, структура металла является плотной и однородной (рис. 3, б).

Химический состав металла приведен в табл. 2. Отклонение содержания титана и никеля по сечению слитка не превышало 0,2 % и сопоставимо с точностью проводимых анализов. Повышенное содержание в сплаве алюминия вызвано его наличием в титановой трубе, используемой при прессовании расходных электродов (0,62 мас. %).

Следующий этап работы состоял в оценке способности слитков никелида титана, полученных с использованием технологии МЭП, подвергаться термомеханической обработке. Предварительную

деформацию литого металла осуществляли способом горячей прокатки в герметичном конверте при температуре 850 °С. Процесс осуществляли в несколько этапов с получением пластин толщиной 30, 14, 5 и 0,8 мм (рис. 4). Процесс прокатки проходил стабильно. На поверхности пластин трещин, надрывов и других грубых дефектов не обнаружено, что свидетельствует о хорошем металлургическом качестве слитков и технологической пластичности металла.

Из пластины толщиной 14 мм вырезали образцы диаметром 8 и 10 мм, длиной 220 мм с целью последующего изготовления проволоки.

Прокатку образцов осуществляли при комнатной температуре в квадратных ручьях двухвалкового прокатного стана. Для предотвращения образования дефектов на поверхности и внутри прутков при обработке реализовали следующую деформационную схему: суммарная деформация между отжигами достигала от 40 на первых этапах прокатки до 75 % на последних этапах обработки. Единичное обжатие выбирали с учетом удельной поверхности образцов, т.е. по мере увеличения общей степени

Таблица 2. Химический состав никелида титана, полученного по технологии МЭП

Место анализа	Массовая доля элементов, %					
	Ti	Ni	Al	O	N	H
Слиток, верх	44,8	54,7	0,17	Не определяли		
Слиток, середина	44,9	54,6	0,16	0,09	0,016	0,002
Слиток, низ	44,7	54,8	0,18	Не определяли		
Проволока	44,1	55,7	-	»		

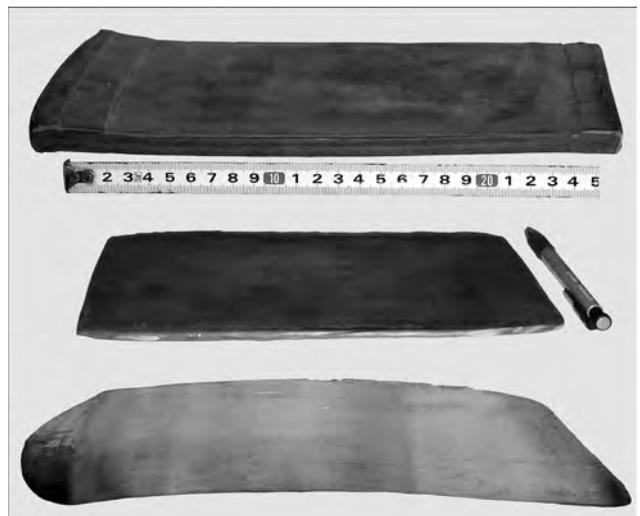


Рис. 4. Пластины сплава Ti-55Ni (мас. %) толщиной 14, 5 и 0,8 мм, полученные способом горячей прокатки в герметичном конверте



Рис. 5. Проволока сплава Ti-55Ni (мас. %) сечением 1,2×1,2 мм, полученная с помощью холодной прокатки

деформации оно увеличивалось от 10 до 17 % за проход. Данный режим позволил осуществить холодную деформацию заготовки из никелида титана без дефектообразования, что свидетельствует о высокой степени гомогенности исходного материала, а также получить проволоку квадратного сечения 1,2×1,2 мм, готовую к дальнейшему переделу (рис. 5).

Промежуточный отжиг выполняли в проходной печи при температуре 560...580 °С со скоростью нагрева от 10 (вначале прокатки) до 50 °С/с (на последних стадиях деформации) без выдержки, с охлаждением на воздухе.

Химический анализ полученной проволоки показал некоторое снижение массовой доли титана в металле (табл. 2), вызванное его угаром в процессе многочисленных отжигов. Этот факт необходимо учитывать для корректировки химического состава металла при выплавке слитков.

Предварительные исследования свойств полученной проволоки показали наличие у металла эффекта памяти формы. Температура начала восстановления формы проволоки, деформированной при комнатной температуре, составляла около 84 °С, что хорошо согласуется с литературными данными для указанного сплава.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность получения способом МЭП из исходных некомпактных шихтовых компонентов слитков никелида титана требуемого химического состава с хорошим формированием боковой поверхности, плотной однородной макроструктурой, без трещин, пор, включений и прочих дефектов. Отработаны режимы деформации металла, получены полуфабрикаты в виде пластин и проволоки. Процесс

деформации проходил стабильно, что свидетельствует о хорошей технологической пластичности металла.

Результаты проведенных работ показали перспективность дальнейших исследований в области МЭП никелидов титана, которые целесообразно направить на определение оптимальных теплофизических режимов выплавки слитков, разработку режимов их термомеханической обработки и всестороннее исследование свойств полученного металла.

1. Хачин В. Н., Пушин В. Г., Кондратьев В. В. Никелид титана: Структура и свойства. — М.: Наука, 1992. — 160 с.
2. Технология производства полуфабрикатов из сплава ТН1 на основе никелида титана с регламентированной структурой и термомеханическими свойствами / А. А. Ильин, И. С. Польшкин, М. Ю. Коллеров и др. // *Материалы междунар. конф. «Ti-2007 в СНГ»* (Ялта, 15–18 апр. 2007 г.). — Киев, 2007. — С. 214–221.
3. Применение титана и материалов на его основе в медицине / А. А. Ильин, В. Н. Карпов, А. М. Мамонов, М. Ю. Коллеров // *Материалы междунар. конф. «Ti-2006 в СНГ»* (Суздаль, 21–24 мая 2006). — Киев, 2006. — С. 234–237.
4. Методы выплавки сплавов системы никель–титан, восстанавливающих первоначальную форму после пластической деформации, и их служебные характеристики: Обзор патентов / В. М. Ермаков, Б. Д. Николаев, Н. Н. Перевалов, Ю. А. Гранаткин // *Электросталеплав. произ-во: Экспресс-информ.* — М: ЦНИИЧМ, 1976. — Вып. 3. — 8 с.
5. Выплавка сложнелегированных сплавов титана и интерметаллидов в индукционной печи с холодным тиглем / А. В. Александров, Е. А. Афонин, С. А. Дело и др. // *Материалы междунар. конф. «Ti-2010 в СНГ»* (Екатеринбург, 16–19 мая 2010 г.). — Екатеринбург, 2010. — С. 14–19.
6. Микроструктура и фазовый состав слитков никелида титана, полученных в установке с холодным тиглем / А. И. Лотков, С. Ю. Заводчиков, В. А. Котрехов и др. // *Материалы междунар. конф. «Ti-2011 в СНГ»* (Львов, 25–28 апр. 2011 г.). — Львов, 2011. — С. 223–233.
7. High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles / Frenzel J. et al. // *J. Alloys and Compounds.* — 2004. — V. 385. — P. 214–223.
8. Березос В. А., Тригуб Н. П. Получение сплавов с эффектом памяти формы на основе титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // *Современ. электрометаллургия.* — 2011. — № 4. — С. 6–8.
9. Коман Я. Ю., Протокилов И. В., Назарчук А. Т. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей // *Материалы междунар. конф. «Ti-2008 в СНГ»* (Санкт-Петербург, 18–21 мая 2008 г.). — СПб, 2008. — С. 96–99.
10. Коман Я. Ю., Протокилов И. В., Назарчук А. Т. Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов // *Теория и практика металлургии.* — 2008. — № 2. — С. 35–40.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова
НАН Украины, Киев
Поступила 27.03.2012