



## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТИТАНА АРГОНОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

**В. П. ПРИЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук, **С. Б. РУХАНСКИЙ**, инж., **С. В. АХОНИН**, д-р техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Н. Ф. ГАДЗЫРА**, д-р техн. наук, **Н. К. ДАВИДЧУК**, канд. техн. наук  
(Ин-т проблем материаловедения НАН Украины)

Приведены результаты комплексных исследований по созданию принципиально нового наплавочного материала — титановой присадочной порошковой проволоки, предназначенной для получения на поверхности титановых сплавов износостойких слоев. Разработан процесс наплавки аргоновой дугой, управляемой внешним поперечным переменным магнитным полем. Показано, что наплавленный металл повышает триботехнические поверхностные характеристики титана ВТ-1 в 10 раз.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, титановая порошковая проволока, аргон, износостойкость наплавленного слоя, управляемое магнитное поле

Титановые сплавы все больше находят применение в энергетическом машиностроении, автомобилестроении, аэрокосмической технике, самолетостроении и других областях промышленности. Однако независимо от типа и системы легирования титановые сплавы склонны к контактному схватыванию при трении и, как следствие, к значительному износу и механическим повреждениям контактных поверхностей. Склонность к схватыванию является существенным недостатком титановых сплавов, который затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным их использование в узлах трения машин и механизмов. Для улучшения триботехнических свойств деталей из титановых сплавов используют те же технологии обработки трущихся поверхностей, что и для других металлов: химико-термическую обработку, гальванопокрытие, напыление, лазерное и электроискровое поверхностное легирование и др. Однако эффективность этих технологий на титановых сплавах, как правило, невысокая и не отвечает необходимым требованиям. Так, при химико-термической обработке толщина слоя не превышает 100 мкм, гальванопокрытия быстро разрушаются, при плазменном покрытии толщина наносимого слоя не превышает 0,35 мкм, при лазерном и электроискровом поверхностном легировании глубина расплавленной зоны составляет не более 120 мкм. Существенными недостатками таких покрытий являются ограничение толщины наносимого слоя, а также его растрескивание. Наиболее перспективно использование процесса дуговой наплавки разработанными для этой цели композиционными материалами и сплавами, содержащими карбиды [1].

Авторы работы [2] разработали износостойчивый материал на титановой основе для наплавки, дисперсионно-упрочненный карбидами. Предложенный сплав обеспечивает при наплавке на детали из титана высокие триботехнические свойства наплавленной поверхности. Однако низкая деформационная способность этого сплава не позволяет создать из него материал в виде присадочной проволоки. Отсутствие таких материалов в значительной мере тормозит создание надежного технологического процесса, который бы позволил изменять поверхностные свойства титановых деталей с помощью аргонодуговой наплавки в автоматическом режиме.

Целью настоящей работы являлось создание принципиально нового типа наплавочного материала для титана, который позволял бы получать на поверхности титановых деталей наплавленный слой с необходимым уровнем трибологических свойств, а также разработать процесс его наплавки с помощью аргоновой дуги.

Разработанный наплавочный материал создан на основе титановой порошковой проволоки, представляющей собой оболочку из технического титана марки ВТ1-00, внутри которой находится сердечник [3]. В состав сердечника введен композиционный порошок, полученный в результате взаимодействия наноразмерного нестехиометрического карбида кремния в виде его твердого раствора углерода с титаном.

Синтез твердого раствора углерода в карбиде кремния обеспечивается в системе дисперсный кремний — терморасширенный графит, что приводит к развитию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) нестехиометрического карбида кремния с пониженным значением параметра решетки [4]. Особенность предложенного процесса заключается в том, что бла-



годаря структурным особенностям ТРГ при его механическом смешивании с дисперсным кремнием формируются конгломераты частиц с соподобной структурой. Такое структурное состояние шихты позволило модифицировать метод СВС за счет его инициации в микрообъемах и интенсификации газотранспортных реакций. Выполнение определенных операций по подготовке терморасширенного графита, степени температурной обработки шихты создает условия для развития «тлеющего» СВС карбида кремния. В таких неравновесных условиях синтеза формируется характерное структурное состояние, обусловленное нарушением стехиометрии, что приводит к созданию наноконпозиционной структуры частиц, подобной состоянию твердого раствора углерода в карбиде кремния [4].

Исследования структуры этих частиц, характеризующихся пониженным значением параметра решетки, показали, что в процессе «тлеющего» СВС формируются такие состояния, которые обусловлены наличием в структуре планарных углеродных дефектов. Концентрация таких дефектов не превышает 1 ат. %, что приводит к формульному содержанию карбида кремния, равному  $Si_{0,993}C_{1,007}$  [5].

Развитие экзотермической реакции в смеси порошка синтезированного карбида кремния (твердого раствора углерода в карбиде кремния) с электролизным порошком титана приводит к формированию новых фаз: карбонитрида и силицида титана ( $TiC_xN_y$  и  $Ti_xSi_y$ ). Изменение соотношения масс между компонентами шихты позволяет получать разные формульные состояния карбонитрида и силицида титана, что является следствием неравновесности процесса и экзотермичности реакции между карбидом кремния и титаном. В результате оптимизации состава шихты установлено соотношение компонентов, равное 25SiC–75Ti. Это позволило сформировать высокодисперсный композиционный порошок, содержащий карбонитрид  $TiC_{0,4}N_{0,6}$  и силицид титана  $Ti_5Si_3$ , используемый в качестве сердечника порошковой проволоки.

С целью предупреждения возникновения пор при наплавке и повышения плотности наплавленного металла в шихту сердечника ввели флюсо-

вую составляющую, содержащую фториды щелочноземельных металлов.

Следует отметить целесообразность выполнения наплавки аргонодуговым методом, который является наиболее распространенным и универсальным при автоматической сварке титана. Главным отличием процесса наплавки от сварки состоит в том, что при наплавке необходимо обеспечить минимальную глубину проплавления основного металла. Выполнить это требование при использовании свободногорящей аргоновой дуги весьма затруднительно, поскольку происходит неконтролируемое глубокое проплавление основного металла по центру столба дуги. Вследствие этого наплавляемый материал смешивается с основным, что приводит к анизотропии свойств наплавленного слоя как по высоте, так и по длине. Кроме того, изменять таким методом ширину наплавленного слоя за один проход достаточно проблематично.

Для регулирования ширины наплавленного слоя и одновременного уменьшения глубины проплавления основного металла использовали внешнее переменное поперечное магнитное поле, позволяющее управлять процессом формирования наплавляемого слоя [6].

В результате проведенных исследований разработан процесс изготовления присадочной порошковой проволоки диаметром 3 мм, а также установлены основные параметры магнитного поля, обеспечивающие получение наплавленного слоя необходимых параметров за один проход. Так, изменение значения магнитной индукции  $B$  в пределах 6,2...7,5 МТл при частоте  $f = 4$  Гц позволяет получать наплавленный слой шириной до 20 мм при глубине проплавления не более 2 мм (рис. 1).

Наплавленный слой металла имеет удовлетворительное формирование (рис. 2, а) и практически не имеет пор (рис. 2, б). Исследование микроструктуры слоев наплавленного металла показало наличие равномерной дендритной структуры (рис. 3). Характерные структурные особенности, которые наблюдаются в центральной части наплавки, сохраняются и непосредственно вблизи зоны сплавления, что свидетельствует о стабильности функциональных свойств наплавленного слоя металла во всем объеме.

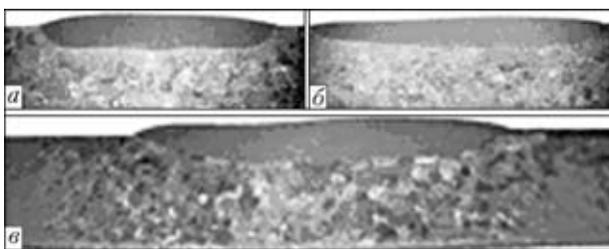


Рис. 1. Влияние значений магнитной индукции на ширину наплавленных слоев: а —  $B = 6,2$  мТл (S1); б — 7 (S2); в — 7,5 (S3)

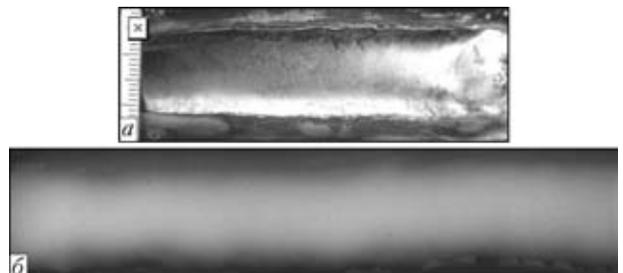


Рис. 2. Внешний вид (а) и рентгеновский снимок (б) наплавленного слоя

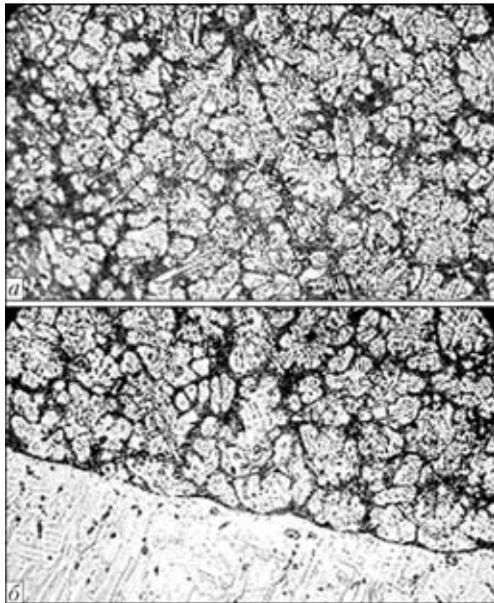


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 200$ ) центральной части наплавленного слоя металла (а) и зоны сплавления (б)

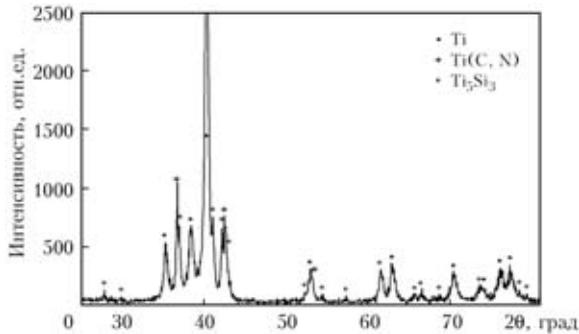


Рис. 4. Типичная рентгенограмма металла наплавленного слоя на основу VT1-1

Исследование фазового состава металла наплавленного слоя с помощью рентгеновского дифракционного анализа показывает, что он состоит из трех фаз:  $\alpha$ -Ti, достехиометрического карбида титана  $TiC_x$  ( $x \approx 0,5$ ), в котором часть атомов углерода замещена атомами азота, и высокотемпературной фазы силицида титана  $Ti_5Si_3$  (рис. 4).

Оценка свойств металла наплавленных слоев показала, что значения микротвердости ( $HV_{0,2}$ ) достигают 14...15 ГПа, а твердости ( $HV_{30}$ ) — 9,0...9,5 ГПа.

Трибологические испытания выполняли на образцах наплавленного металла (S1, S2, S3), полученных на разных режимах (см. рис. 1). Для сравнения исследовали трибологические свойства основы VT1-1. Износостойкость оценивали по потере массы образцом на пути трения 1 км. Полученные результаты испытаний представлены на рис. 5.

Given are the results of comprehensive investigations on development of a fundamentally new cladding consumable: the titanium flux-cored filler wire, aimed at deposition of wear-resistant layers on the surface of titanium alloys. Described is the process developed for cladding with the argon arc controlled by the external transverse alternating magnetic field. It is shown that the deposited metal provides a 10 times increase in tribotechnical surface properties of titanium VT1-1.

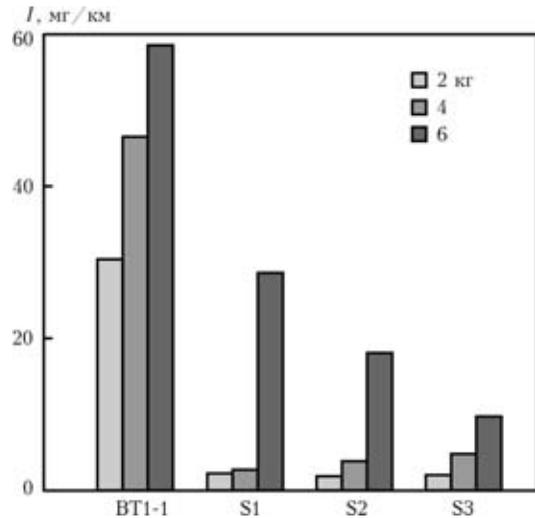


Рис. 5. Зависимость интенсивности износа образцов  $I$  от нагрузки

Сравнив интенсивность износа (потерю массы) наплавленных образцов с таким же показателем образца основы, видно, что наплавленные образцы превосходят износостойчивость основы при нагрузках 2 и 4 кг практически на порядок. При нагрузке 6 кг износостойчивость наплавленных образцов уменьшается, но в сравнении с основой она в 2...6 раз выше. Износ контртела (сталь 45,  $HRC = 45...48$ ) уменьшается при нагрузках 2 и 4 кг в 5...7 раз, а при 6 кг — в 2,6...2,8 раза.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить принципиальную возможность повышения триботехнических характеристик поверхности пластин сплава титана VT1-1 в 10 раз.

1. Замков В. Н., Ванжула Т. В., Прилуцкий В. П. Повышение износостойкости деталей из титановых сплавов // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 31–35.
2. Wear resistant titanium alloys / W. Takahashi, M. Okada, Y. Shida, M. Nakanishi // Netsu Shori = J. Jap. Soc. Heat Treat. — 1993. — 33, № 5. — P. 283–288.
3. Пат. 3883713 США, МКИ В 23к 35/22. Порошковая проволока / С. М. Гуревич, В. Н.Замков, В. П. Прилуцкий и др. — Опубл. 13.05.1975.
4. Гадзыра Н. Ф., Гнесин Г. Г. Технологические аспекты синтеза наночастиц твердого раствора углерода в карбиде кремния и нанокomпозиционных порошков на его основе. Нанокристаллические материалы // Тр. ИПМ им. И. Н. Францевича. Сер. «Физико-химические основы порошковых материалов». — Киев, 2003. — С. 64–75.
5. Гадзыра Н. Ф., Гнесин Г. Г., Михайлик А. А. Сегрегационные явления в порошках неравновесного твердого раствора с избытком атомов углерода, замещающих атомы кремния в структуре SiC // Сверхтвердые материалы. — 2005. — № 5. — С. 56–64.
6. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-croove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — P. 37–41.