

УДК 539.2:621.793

ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО СМЕШИВАНИЯ ТИТАНА И НИКЕЛЯ С АЛЮМИНИЕМ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

Е.А. Будовских, Л.П. Бащенко, Н.И. Макеева

E-mail: budovskikh@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Целью работы является изучение возможности увеличения глубины зоны обработки при электровзрывном легировании вследствие дополнительного количества теплоты, выделяющегося при экзотермических реакциях взаимодействия смешиваемых компонентов. Экспериментально показано, что при легировании поверхности алюминиевой подложки титаном и никелем при длительности импульса воздействия 100 мкс глубина зоны обработки может достигать 150 – 200 мкм. Проведены оценочные расчеты влияния тепловых эффектов, характерных для систем Ti – Al и Ni – Al при жидкофазном смешивании компонентов, позволяющие объяснить результаты обработки.

Ключевые слова: электровзрывное легирование, системы Ti – Al и Ni – Al, жидкофазное смешивание, зона обработки, световая микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ, теплота химических реакций.

FEATURES OF LIQUID MIXING OF TITANIUM AND NICKEL WITH ALUMINUM DURING ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING

E.A. Budovskikh, L.P. Bashchenko, N.I. Makeeva

E-mail: budovskikh@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The aim of the work is to study the possibility of increasing the depth of the treatment zone during electroexplosive alloying due to the additional amount of heat released during exothermic reactions of mixed components interaction. It was experimentally shown that during the alloying of the aluminum substrate surface with titanium and nickel with a pulse duration of 100 μ s, the depth of the treatment zone can reach 150 – 200 μ m. The estimates of the influence of thermal effects, characteristic of the Ti – Al and Ni – Al systems during liquid-phase mixing of the components, were performed. The allow the processing results to be explained.

Keywords: electroexplosive alloying, Ti – Al and Ni – Al systems, liquid-phase mixing, treatment zone, light microscopy, X-ray phase analysis, heat of chemical reactions.

Концентрированные потоки энергии (КПЭ) широко используются в промышленности для обработки материалов. К КПЭ относят лазерное излучение, электронные и ионные пучки, плазменные струи. Они позволяют проводить обработку с оплавлением поверхности. При электровзрывном легировании (ЭВЛ) металлов инструментом воздействия на поверхность являются импульсные многофазные плазменные струи, которые формируются при разряде на проводники емкостного накопителя энергии с использованием коаксиально-торцевой системы токоподводящих электродов. Особенностью струй является разделение вдоль их оси быстрого плазмен-

ного компонента и относительно медленных конденсированных частиц продуктов электровзрывного разрушения проводников. При воздействии струи на поверхность происходит нагрев металла и легирование оплавленного слоя компонентами струи. Основной вклад в процесс легирования вносят конденсированные частицы.

Глубина зоны легирования зависит от частоты разрядного тока емкостного накопителя энергии электровзрывной установки и ее энергозапаса, который определяет давление в ударносжатом слое плазмы, формируемом вблизи облучаемой поверхности, и ее температуру. Глубина зоны легирования также зависит от теплофи-

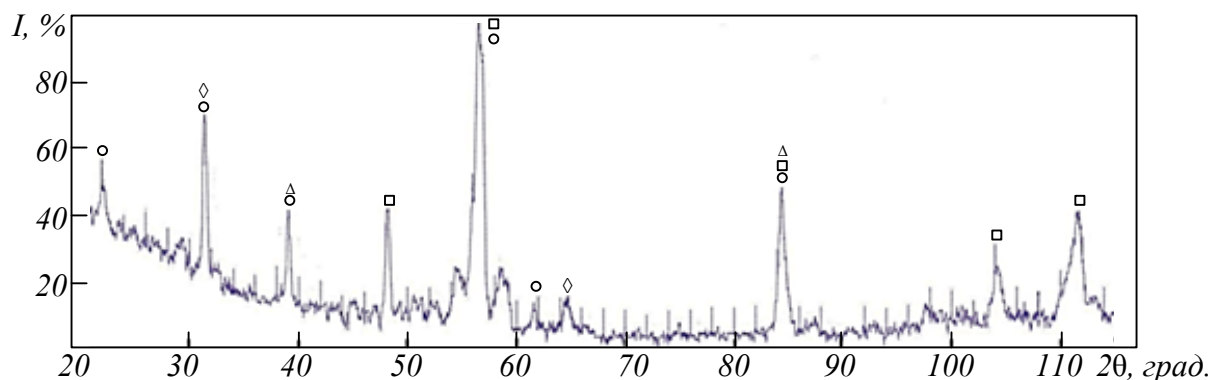


Рис. 1. Дифрактограмма поверхности зоны электровзрывного никелирования алюминиевой подложки:
○ – Al_3Ni_2 ; □ – Al; Δ – AlNi; ◇ – AlNi_3

зических свойств обрабатываемого металла или сплава. При эффективном (равном одному периоду разрядного тока) времени воздействия 100 мкс глубина обрабатываемой поверхности достигает нескольких десятков микрометров [1]. Важной особенностью обработки является то, что нагрев поверхности происходит в условиях образования вблизи нее ударно-сжатого слоя с давлением порядка 10 МПа. Это приводит к перегреву расплава выше температуры кипения при нормальном давлении, а после окончания импульса воздействия на поверхность – его вскипанию и интенсивному перемешиванию. Это обеспечивает активное взаимодействие компонентов формируемой системы.

Сравнительно небольшая глубина зоны легирования ограничивает возможности практического использования ЭВЛ. При этом она может быть увеличена вследствие, например, выделения в зоне легирования дополнительного количества теплоты при экзотермических реакциях взаимодействия смешиваемых компонентов. Такие реакции с высоким тепловым эффектом характерны для систем Ti – Al, Ni – Al, Ti – C, Ti – В и др. Целью настоящей работы является реализация такой возможности при ЭВЛ.

В работах [1, 2] при электровзрывном алитировании титана и никеля тепловой эффект оказался выражен слабо, что можно связать с высокой температурой плавления данных материалов, использованных в качестве подложек. В настоящей работе изучали особенности электровзрывного титанирования и никелирования поверхности алюминия, обладающего сравнительно низкой температурой плавления и высокими тепло- и температуропроводностью. Обработку поверхности проводили в режиме, когда поглощаемая плотность мощности составляла $3,7 \cdot 10^9$ Вт/м².

Рентгеноструктурный фазовый анализ показал наличие в модифицированных слоях интерметаллидов с высоким содержанием алюминия. Так, после никелирования основной фазой является интерметаллид Al_3Ni_2 (рис. 1), а после алитирования – TiAl_3 . Обращает на себя внимание присутствие на

поверхности структурно свободного алюминия, что может свидетельствовать об интенсивном перемешивании оплавленного слоя и выносе конвективными потоками алюминия из глубины на поверхность зоны легирования.

Это подтверждают исследования поверхности поперечных шлифов методом световой микроскопии. Видно (рис. 2), что даже в глубине зоны легирования на границе с подложкой происходит интенсивное конвективное перемешивание расплава. Другими важными особенностями зоны легирования являются ее сравнительно большая глубина, достигающая 150 – 200 мкм, а также высокая пористость (рис. 3).

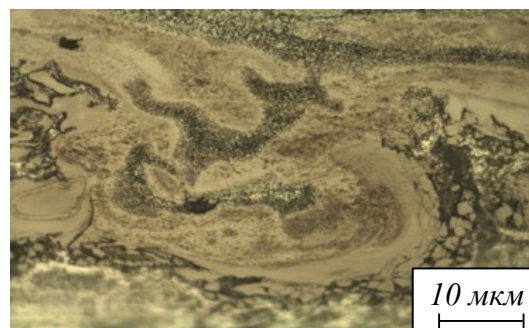


Рис. 2. Изображение особенностей структуры границы раздела зоны электровзрывного титанирования алюминиевой подложки. Световая микроскопия

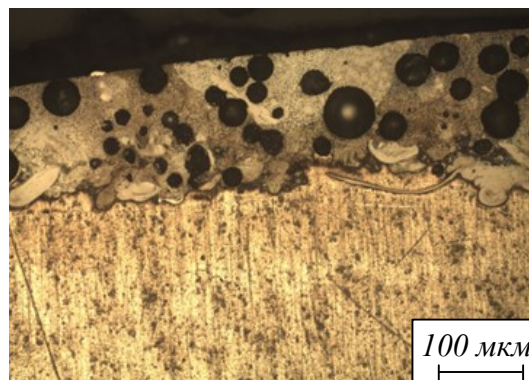


Рис. 3. Микрофотография модифицированного поверхностного слоя при никелировании алюминия

В связи с этим с использованием соотношений, приведенных в работе [1], проведена оценка ряда физических параметров, позволяющих дать качественное объяснение полученных результатов. Оценка показывает, что оплавление поверхности алюминия при воздействии плоского теплового источника достигается при поглощаемой плотности мощности $q = 2,0 \cdot 10^9$ Вт/м², а при $q = 3,7 \cdot 10^9$ Вт/м² происходит оплавление на глубину только 7 мкм. При этом количество теплоты, выделяющейся при экзотермической реакции при образовании соединения Al_3Ni_2 , составляет $2,88 \cdot 10^5$ Дж/моль. Это количество теплоты примерно в шесть раз больше, чем необходимо для того, чтобы в адиабатических условиях нагреть алюминий от температуры плавления до температуры кипения. Этот результат позволяет объяснить образование пор. При этом следует учитывать, что теплота экзотермической реакции в рассматриваемых условиях расходуется не только на испарение, но и на продвижение фронта плавления вглубь. Полученные результаты показывают, что глубина зоны плавления без учета теплоты, затрачиваемой на испарение расплава, может достигать 200 мкм. В реальных условиях, когда происходит вскипание расплава с образованием пор, толщина зоны легирования оказывается меньше.

Выводы

На примере систем Ti – Al и Ni – Al установлено, что при жидкофазном смешивании термореагирующих компонентов в условиях электро-взрывного легирования возможно в несколько раз повысить толщину модифицированных слоев по сравнению со случаем, когда экзотермические эффекты не проявляются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. Обработка титанового сплава импульсной гетерогенной плазмой с оплавлением и легированием поверхностного слоя алюминием и никелем / В.П. Симаков, Е.А. Будовских, П.С. Носарев, Г.В. Бобров // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 5. С. 60 – 63.

© 2020 г. *Е.А. Будовских, Л.П. Бащенко, Н.И. Макеева*

Поступила 28 февраля 2020 г.