В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, В. О. Харламов, Д. Д. Твердышева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В МНОГОСЛОЙНОМ ТИТАНО-СТАЛЬНОМ КОМПОЗИТЕ
ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРЕВАХ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

В работе приведены результаты исследований процессов диффузии в пятислойном сваренном взрывом композите титан ВТ-20+сталь 08Х18Н10Т после термической обработки при температурах 850 и 900 °С и временах выдержки 20–100 часов. Изучены особенности формирования микроструктуры, микротвердость, химический состав диффузионных зон композита с использованием оптической, электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа.

Ключевые слова: сварка взрывом, термическая обработка, композит титан-сталь, микроструктура, электронная микроскопия, рентгеноспектральный анализ.

V. N. Arisova, L. M. Gurevich, A. F. Trudov, V. O. Kharlamov, D. D. Tverdysheva

**STUDY OF DIFFUSION PROCESSES IN A MULTILAYER
TITANIUM-STEEL COMPOSITE UNDER LONG HEATING**

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of studies of diffusion processes in a five-layer explosion-welded composite titanium VT-20+steel 08Cr18Ni10Ti after heat treatment at temperatures of 850 and 900 °C and holding times of 20-100 hours. The features of the formation of the microstructure, microhardness, and the chemical composition of the diffusion zones of the composite have been studied using optical and electron microscopy and X-ray spectral analysis.

Keywords: explosion welding, heat treatment, titanium-steel composite, microstructure, electron microscopy, X-ray spectral analysis.

Введение

В [1–4] приведены результаты исследований структуры и свойств пятислойного слоистого композиционного материала (СКМ) состава титан ВТ-20+сталь 08Х18Н10Т после СВ и термической обработки при температурах 800–900 °С и временах выдержки 1–10 часов.

Однако детали, изготовленные из данного композиционного материала, могут работать и более длительно при высоких температурах.

Данная работа является продолжением исследований по изучению диффузионных процессов многослойного интерметаллидного композита ВТ-20+сталь 08Х18Н10Т при температурах 850 и 900 °С при увеличении времени выдержки от 20 до 100 часов.

Материалы и методы исследования

Пятислойный композит получали сваркой взрывом, которую осуществляли по одновременной плоскопараллельной схеме: трех титановых (1,2 мм) и двух стальных (1 мм) слоев. Термическую обработку осуществляли в печи SNOL 8.2/1100 при температурах 850 и 900 °С и временах выдержки 20, 50 и 100 час.

Микроструктуру исследовали на оптическом световом микроскопе «Olympus BX61» и растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, который снабжен энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments) для определения химического состава. Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М при нагрузке на индентор 1,0 Н.

Результаты и их обсуждение

В [4] было показано, что с увеличением температуры от 800 до 900 °С и временах выдержки до 10 часов на всех границах происходит диффузия преимущественно в ВТ-20. При повышении температуры увеличивалась толщина диффузионной зоны, которая при времени выдержки 4 ч состояла из двух прослоек: первой – тонкой, прилегающей к стали и второй – значительно большей толщины, прилегающей к ВТ20; при времени выдержки 10 ч диффузионная зона состояла из трех прослоек – широкой и двух тонких.

При выдержке 4 часа тонкая прослойка имела толщину ~ 1 мкм при температуре отжига 800 °С, 2 мкм при температуре 850 °С и увеличивалась до 4 мкм при температуре 900 °С. Толщина широкой прослойки варьировалась от 10–14 мкм при температуре 800 °С до 50–60 мкм при 900 °С, что ~ на 30–35 мкм больше, чем при времени выдержки 1 час. Увеличение времени выдержки до 10 ч привело к появлению третьей, тонкой прослойки 2 толщиной 3 мкм, 4 мкм и 6 мкм при 800, 850 и 900 °С соответственно при одновременном увеличении толщины всей диффузионной зоны: тонкая прослойка 1 достигала размеров 6 мкм, 5 мкм и 12 мкм, а широкая – 21 мкм, 38 мкм и 117 мкм, при 800, 850, 900 °С соответственно.

При увеличении времени выдержки от 20 до 100 часов при температурах 850 и 900 °С идет дальнейшее развитие диффузионных процессов, которые на всех границах пятислойного композита протекают идентично.

На рис. 1 приведены микроструктуры границ свариваемых сплавов после указанных режимов термической обработки.

Рис. 1. Микроструктура сваренного взрывом титано-стального КМ после термообработки (см. также с. 16): а, б – 850 и 900 °С, время выдержки 20 ч; в, г – 850 и 900 °С, время выдержки 50 ч; д, е – 850 и 900 °С, время выдержки 100 ч. *50

Рис. 1. Окончание

На рис. 2, 3 приведены электронные снимки диффузионных зон соединения при температурах 850 °С и 900 °С, соответственно, при временах выдержки 20, 50 и 100 часов, на которых идентифицируются четыре прослойки – одна широкая на границе с BT20 и три узких – по мере приближения к стали 08X18H10T. При данных температурах и времени выдержки 10 часов наблюдалась одна широкая и только две узкие прослойки [4].

При термообработке длительностью 20 часов толщина диффузионной зоны меняется следующим образом: толщина широкой прослойки, прилегающей к BT20, варьируется от 45,64 до 181,88 мкм и от 168,55 до 170,75 мкм при температуре 850 и 900 °С соответственно. Тонкая прослойка 1, прилегающая к широкой, меняет свою толщину от 3,16 до 9,49 мкм и от 6,46 до 7,84 мкм, а тонкая прослойка 3, прилегающая к стали – от 6,05 до 10,86 мкм и от 17,87 до 19,52 мкм при тех же температурах, между тонкими прослойками 1 и 3 располагается прослойка 2 толщиной 2–4 мкм.

После увеличения выдержки до 50 ч толщина прослоек возросла: широкая достигла 135,42 мкм и 291,45 мкм при 850 и 900 °С соответственно, тонкая прослойка 1 – 7,84 мкм и 16,36 мкм, тонкая прослойка 3 – 14,98 и 76,99 мкм, а толщина прослойка 2 практически осталась прежней.

При выдержке 100 часов толщина широкой прослойки увеличилась до 157,14 мкм и 378,48 мкм при 850 и 900 °С соответственно. Толщина тонкой прослойки 1 незначительно возросла при 850 °С до 9,76 мкм, а при 900 °С уменьшилась до 12,09 мкм. Тонкая прослойка 3 претерпела также незначительные изменения – при 850 °С толщина достигла 17,59 мкм, а при 900 °С уменьшилась до 47,66 мкм, прослойка 2 несколько увеличивается до 5–6 мкм.

Значения микротвердости диффузионных зон широкой прослойки при всех вышеуказанных режимах составляет около 4–4,5 ГПа, при этом микротвердость титановых слоев – 2,50–3,55 ГПа, а нержавеющей стали – 1,65–1,80 ГПа.

a

б

в

Рис. 2. Вид диффузионных прослоек в композите BT20-сталь 08X18H10T после термообработки 850 °C и временах выдержки:
a – 20 час $\times 2000$; *б* – 50 час $\times 1000$; *в* – 100 час $\times 1200$

а

б

в

Рис. 3. Вид диффузионных прослоек в композите ВТ20-сталь 08Х18Н10Т после термообработки 900 °С и временах выдержки:
а – 20 час $\times 1000$; б – 50 час $\times 1000$; в – 100 час $\times 550$

Распределение химических элементов в диффузионной зоне композита, подвергнутого термической обработке при температурах

850 °C и 900 °C со временем выдержки 20, 50 и 100 часов, представлены на рис. 4–6.

Рис. 4. Распределение химических элементов в диффузионной зоне пятислойного титано-стального композита после отжига при температурах:
а – 850 °C; б – 900 °C, время выдержки 20 часов

При времени выдержки 20 часов (рис. 4) содержание алюминия в широкой диффузионной прослойке постоянно по толщине (~ 13 % ат.) и по мере приближения к узкой прослойке оно монотонно снижается. Вместе с тем содер-

жание хрома и никеля увеличивается. Количество титана снижается при приближении к узкой диффузионной прослойке с 85 % ат. до 45 % ат., и одновременно растет содержание железа с 3 % ат. до 40 % ат.

Рис. 5. Распределение химических элементов в диффузионной зоне пятислойного титаностального композита после отжига при температурах:
а – 850 °C; б – 900 °C, время выдержки 50 часов

При времени выдержки 50 часов (рис. 5) количество хрома ничтожно мало в широкой диффузионной прослойке (~ 1 % ат.), и оно резко возрастает в узкой прослойке до 25 % ат. Содержание алюминия монотонно снижается по мере приближения к узкой диффузионной

прослойке с 13–15 % ат. до 2–3 % ат. Никель имеется в небольшом количестве ~ 7 % ат. Количество титана по мере приближения к узкой прослойке снижается с 85 % ат. до 45 % ат., а железа – увеличивается с 5 % ат. до 45 % ат.

Рис. 6. Распределение химических элементов в диффузионной зоне пятислойного титаностального композита после отжига при температурах:
а – 850 °С; б – 900 °С, время выдержки 100 часов

При увеличении выдержки до 100 часов (рис. 6) содержание алюминия в широкой диффузионной прослойке постоянно по толщине (~ 15 % ат.) и по мере приближения к узкой прослойке оно монотонно снижается до 5 % ат., содержание хрома и никеля увеличивается до 5 % ат. и 25 % ат. соответственно. Количество титана снижается при приближении к узкой диффузионной прослойке с 85 % ат. до 40 % ат., а вместе с тем растет содержание железа с 5 % ат. до 40 % ат.

Выводы

Металлографические исследования и энергодисперсионный анализ диффузионных зон вблизи границ соединения пятислойного титано-стального композита ВТ20+08Х18Н10Т, сформировавшихся при температурах 850 °С и 900 °С и временах выдержки 20, 50 и 100 ч, показали:

- с увеличением температуры и времени выдержки на всех границах происходит развитие диффузионных процессов преимущественно в ВТ-20; диффузионная зона состоит из че-

тырех прослоек – трех тонких возле коррозионностойкой стали и широкой – возле титанового сплава;

- микротвердость диффузионных зон, сформировавшихся при изученных температурах и временах выдержки, 4,0–4,5 ГПа, микротвердость стальных и титановых слоев составляет около 1,8 и 3,0 ГПа соответственно;

- диффузионные прослойки насыщены компонентами, входящими как в состав коррозионностойкой стали, так и титанового сплава, а именно Fe, Ni, Cr, Ti и Al.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Structure formation in the zones of joints obtained by explosion welding with subsequent rolling of a five-layer titanium-steel composite / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, А. Г. Серов, В. О. Харламов // *Metallurgist*. - 2019. - Vol. 63, No. 1-2 (April). - P. 96-104.
2. Арисова, В. Н. Особенности формирования структуры на границах сваренного взрывом пятислойного титаностального композита / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, А. Г. Серов, В. О. Харламов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (219) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 19–22.

---

3. Влияние термической обработки на диффузионные процессы в сваренном взрывом пятислойном титаностальном композите / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, А. И. Богданов, В. О. Харламов, В. А. Изюмский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (233) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–12.

4. Формирование многослойного титаностального интерметаллидного композита / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, Д. Д. Твердышева, В. А. Изюмский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (241) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 6–14.