

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ W–Ni–Al В РЕЖИМЕ СВС

А.С. Щукин\*, А.Е. Сычёв

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\* [shchukin@ism.ac.ru](mailto:shchukin@ism.ac.ru)

Работа посвящена исследованию процессов самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) в системе на основе Ni–Al с металлическим W в виде порошка или фольги. Исследована тонкая структура сварного соединения между интерметаллидом NiAl и W подложкой и процесс горения в зависимости от реакционного состава и количества высокоэзотермичной добавки NiO. При соединении W-подложки с интерметаллидом NiAl в процессе СВС происходит формирование градиентного сварного соединения толщиной 200÷400 мкм (рис. 1в, 2а). В переходном слое (Ni–Al)/W образуются дендриты W ( $\alpha$ -фазы) (рис. 1г) и псевдобинарная эвтектика на основе NiAl ( $\beta$ -фазы), содержащая преципитаты W-содержащей фазы размером менее 50 нм и игольчатые включения Ni<sub>3</sub>Al ( $\gamma'$ -фазы). В переходном слое также обнаружена наноструктурированная тройная эвтектика  $\alpha + \gamma + \gamma'$ , имеющая сетчатую структуру (рис. 2в, г) на основе твёрдого раствора и интерметаллидных зёрен Ni<sub>3</sub>Al размером около 100 нм. В результате специально проведенного химического травления в переходном слое обнаружены пучки разветвляющихся волокон W длиной до 10 мкм и толщиной нитей 50 нм (рис. 1а, 1б).

В результате взаимодействия расплава NiAl с W фольгой произошла модификация её поверхности с образованием на ней дендритов (рис. 1д) и глобулярных выделений (рис. 1е). Это значительно увеличивает площадь поверхности W подложки и способствует созданию прочного соединения между подложкой и интерметаллидной наплавкой NiAl.

Исследовано влияние состава реакционной смеси Ni+Al+W+NiO на параметры горения и микроструктуру продуктов синтеза, а также влияние состава смеси на температуры воспламенения и горения. Содержание W в исходной смеси (Ni+Al)+1÷5 ат.%W не влияет на количество растворившегося в нем W в процессе СВС и составляет 0,4 ат.% W. Увеличение количества NiO в смеси (Ni+Al)+5ат.%W+xNiO ( $x = 1\div 5$  ат.%) увеличивает содержание растворившегося W до 0,6 ат. % при содержании 5 ат.% NiO.

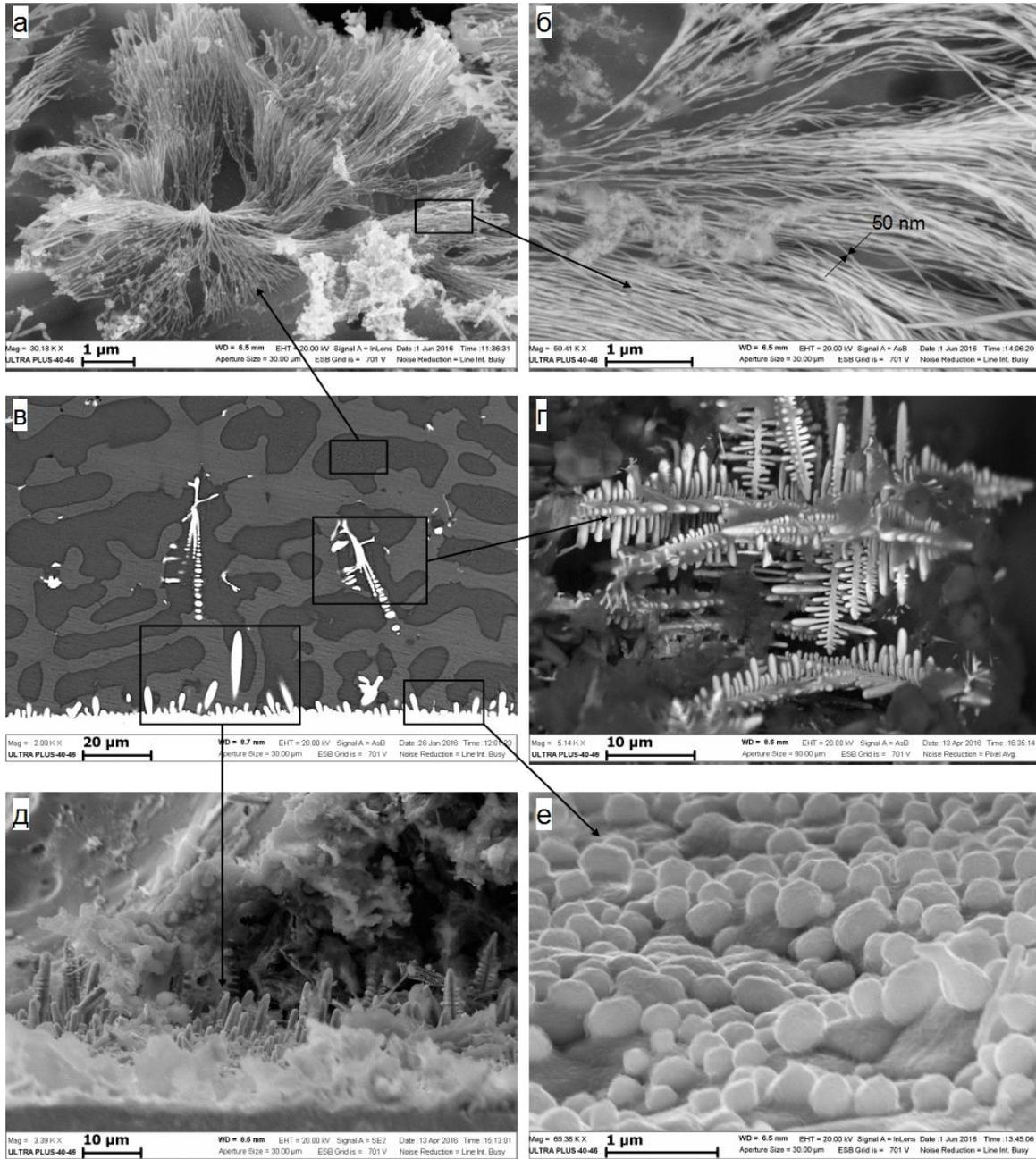


Рис. 1. а, б – пучки волокон, вытравленные из эвтектики NiAl–W; в – шлиф сварного соединения между W фольгой и интерметаллидом NiAl до травления; г – дендриты в переходном слое после травления; д, е – глобулярные и дендритоподобные образования на поверхности W фольги после травления.

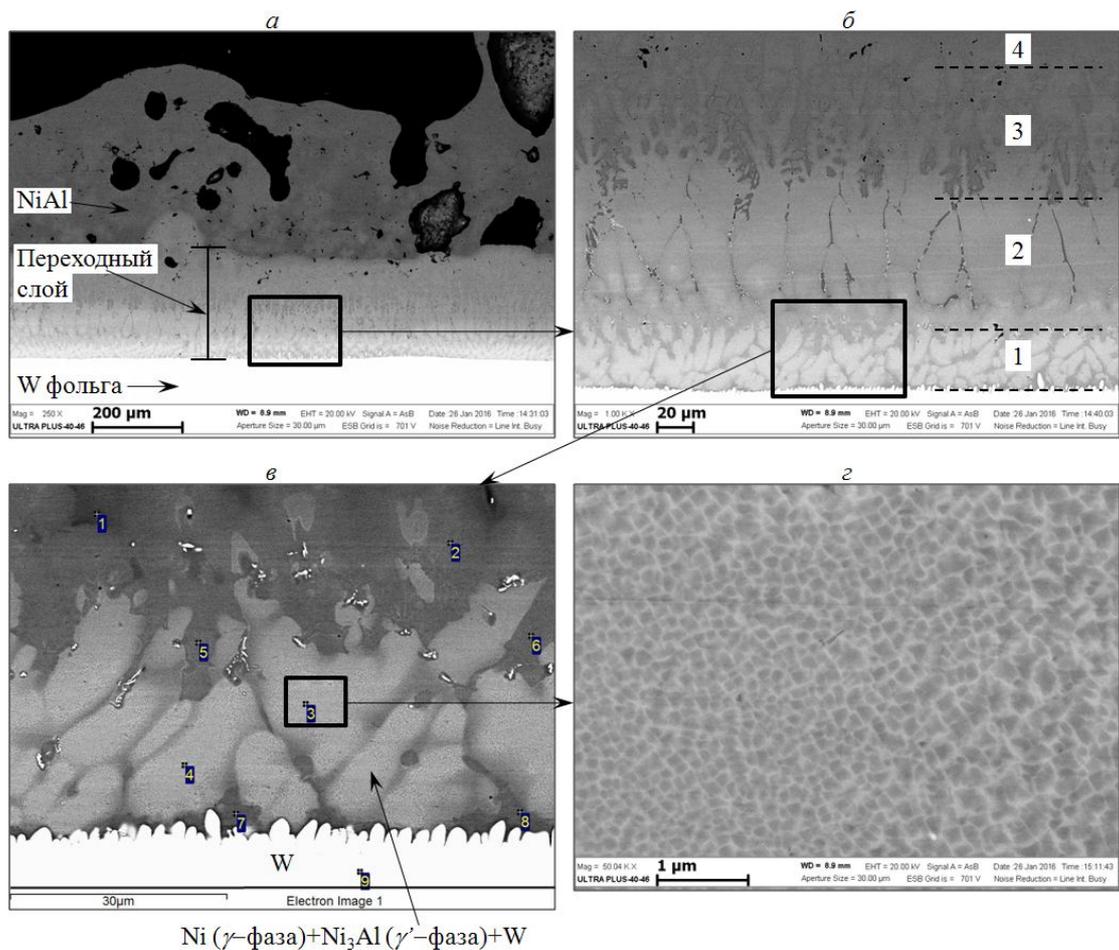
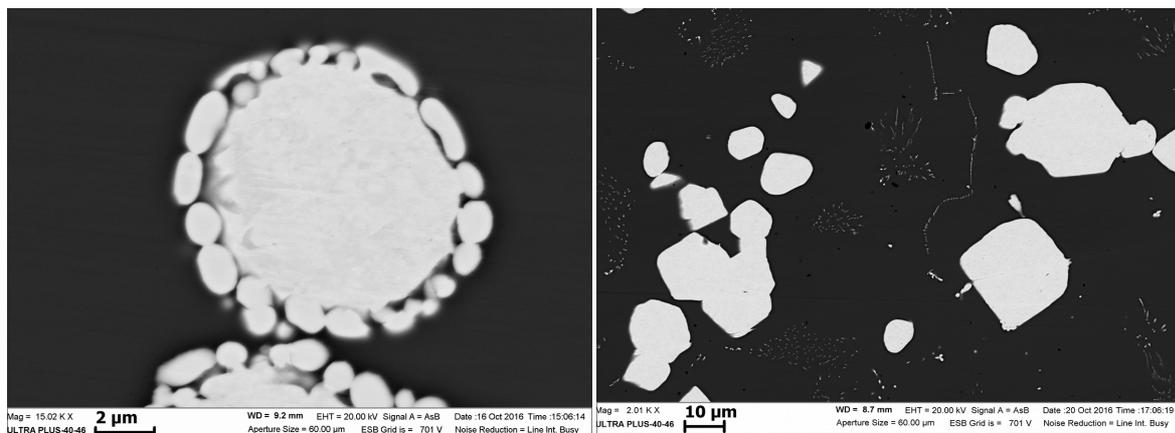


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения между W и NiAl на поверхности W-фольги с образованием тройной эвтектики.

Введение реакционной добавки NiO в исходную смесь не приводит к формированию на поверхности частиц W слоя глобулярных образований (рис. 3). Увеличение содержания NiO в смеси (Ni+Al) + 5 ат. % W + 1÷5 ат. % NiO приводит к уменьшению количества псевдобинарной эвтектики NiAl-W в образцах и увеличению количества W-содержащих дендритов.

При протекании СВС в системе Ni+Al+W+NiO была обнаружена стадийность процесса горения при протекании реакции. Состав исходной смеси оказывает сильное влияние на скорость распространения фазовых волн в процессе СВС. Скорость распространения волны горения в образцах из составов Ni+Al+W составляет  $0,7 \div 0,9$  м/с, в образцах из составов Ni+Al+W+NiO значительно ниже и составляет  $0,2 \div 0,4$  м/с.



(а)  $(Ni+Al) + 3 \text{ ат. \% } W$

(б)  $(Ni+Al) + 5 \text{ ат. \% } W + 1 \text{ ат. \% } NiO$

Рис. 3. Образование глобул на поверхности частиц W (а) без оксидной добавки NiO и отсутствие их на образцах с оксидной добавкой (б).

При помощи высокоскоростной видеосъемки зафиксировано прохождение волн «горения» в процессе реакции в исследуемых системах. Исходные образцы представляли собой цилиндры диаметром 3 мм и высотой  $0,5 \div 1$  мм. Для составов  $(Ni+Al) + 1 \div 5$  ат. % W наблюдаются одна или несколько точек зажигания (инициирования). Для составов  $(Ni+Al) + 5$  ат. % W +  $1 \div 5$  ат. % NiO процесс горения отличается — после прохождения волны горения наблюдается образование капель расплава на поверхности образцов и значительное увеличение яркости образцов после прохождения волны горения. При горении системы состава  $(Ni+Al) + 5$  ат. % W + 5 ат. % NiO зафиксировано последовательное прохождение двух фронтов волн разной яркости и с разным воздействием на геометрию образца — видно, что первая волна не приводит к существенному изменению геометрической формы образца, а вторая волна приводит к плавлению всего образца сразу же за фронтом и изменению его формы (рис. 4). Исходная форма образцов в процессе реакции приобретает каплевидную форму, что является следствием формирования расплава при горении исследуемых систем.

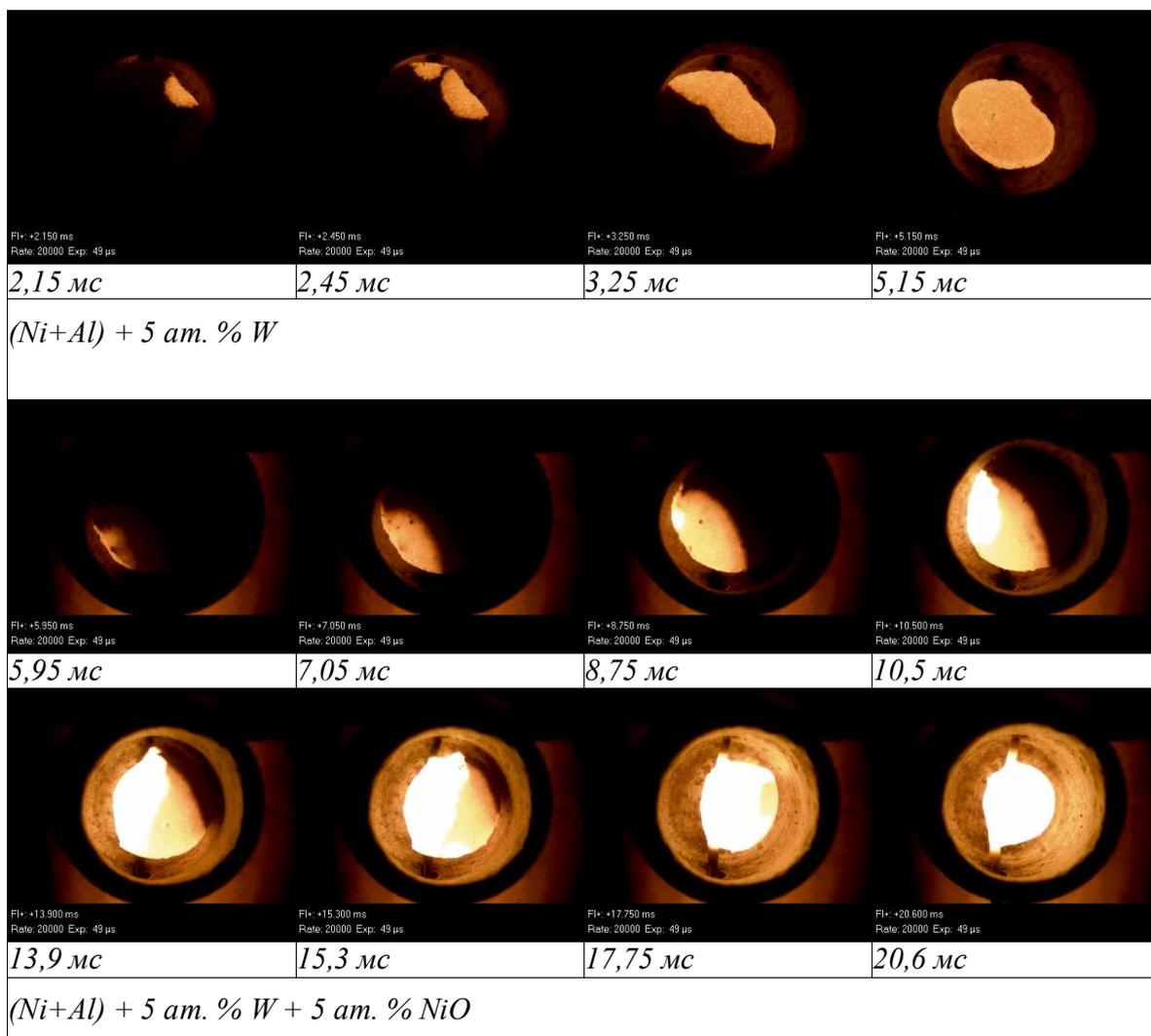


Рис. 4. Видеокadres процесса горения образцов составов  $(Ni+Al) + 5 \text{ ат. \% } W$  и  $(Ni+Al) + 5 \text{ ат. \% } W + 5 \text{ ат. \% } NiO$ . Указано время от начала видеозаписи. Скорость съёмки 20000 кадров/сек.

## Литература

1. A.E. Sytshev, D. Vrel, Yu.R. Kolobov, D.Yu. Kovalev, E.V. Golosov, A.S. Shchukin, S.G. Vadchenko. Combustion synthesis in the Ni-Al-W system: Some structural features. *Int. J. of SHS*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 110–113. doi: 10.3103/S1061386213020118
2. А.Е. Сычев, Д. Врел, Ю.Р. Колобов, И.Д. Ковалев, Е.В. Голосов, А.С. Щукин, С.Г. Вадченко. Особенности структуры и фазообразования в системе Ni-Al-W в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Композиты и наноструктуры*. 2013, № 2, стр. 51–58.