

Синтез композита на основе системы Ni–Al–C методом электротеплового взрыва под давлением

Щербаков А.В., Сычев А.Е. @

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН

@sytshev@ism.ac.ru

Работа поддержана проектом РФФИ №18-08-00181.

В работе методом электротеплового взрыва (ЭТВ) под давлением 96 МПа синтезирован композиционный материал на основе Ni–Al–C. В процессе ЭТВ в порошковой реакционной среде (Ni+Al+C) формируется расплав на основе Ni–Al, в котором происходит растворение углерода. Показано, что в процессе кристаллизации конечного продукта углерод, вследствие низкой растворимости в NiAl, располагается на поверхности интерметаллидных зерен NiAl в виде многослойных графитовых нанопленок толщиной 50-80 нм, заполняя межзеренное пространство. Микротвердость синтезированного материала - 3084 МПа.

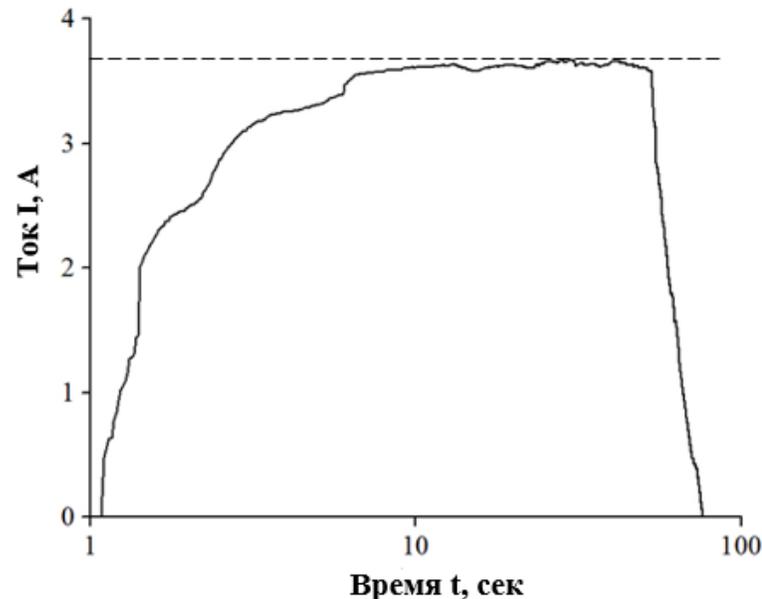
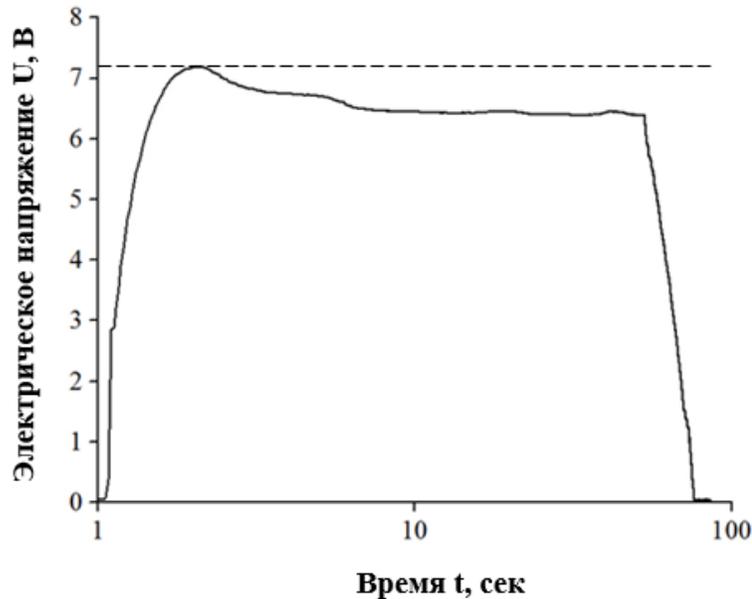


Рис. 1. Зависимости изменения электрического напряжения U (а) и тока I (б) от времени при ЭТВ.

Исходные реагенты:

порошки Ni (марка ПНК-1), Al (марка АСД-1) и технического углерода (сажа, марка П803-Т)

Образцы цилиндрической формы массой $m=28$ г, диаметром $d=20$ мм и высотой $h=25$ мм прессовали под давлением $P=80$ МПа ($F=25$ кН) до плотности $\rho=3,57$ г/см³.

Зависимости изменения относительного сопротивления R/R_{\max} и мощности Джоулева нагрева в процессе ЭТВ

- На начальной стадии предвзрывного нагрева электрическое сопротивление R увеличивается до максимального значения ($R/R_{\max}=1$). В момент времени $t_1=1,4$ с происходит воспламенение образца. При этом электрическое сопротивление R резко падает на 30 % от максимального значения, а электрическая мощность P увеличивается с 9 до 13 кВт. В момент времени $t_3=53$ с производили плавное уменьшение электрического напряжения R до нуля.
- Из полученных значений электрической мощности от времени определены количества Джоулева тепла, подведенные к образцу до обозначенных моментов времени: $Q(t_1)=2$ кДж, $Q(t_2)=101$ кДж, $Q(t_3)=1237$ кДж. Всего к образцу было подведено 1394 кДж энергии.

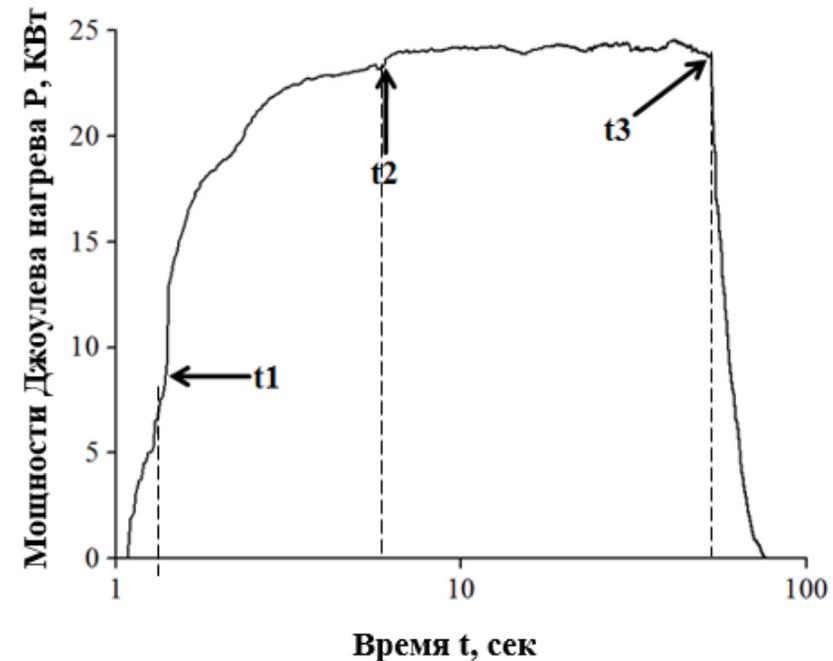
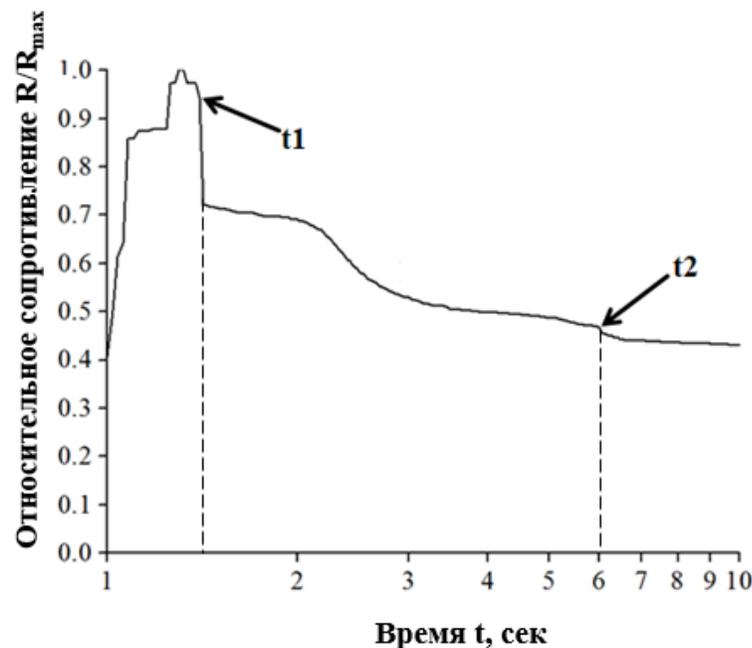


Рис. 2. Зависимости изменения относительного сопротивления R/R_{\max} (а) и мощности Джоулева нагрева P (б) от времени t .

Рентгенофазовый анализ синтезированного материала на основе Ni-Al-C

- Результаты рентгенофазового анализа показали, что основной фазой является моноалюминид никеля NiAl (β -фаза) с упорядоченной ОЦК кристаллической решеткой типа CsCl (B2).
- В области $26,4-26,6^\circ$ на рентгенограмме наблюдается слабый пик, соответствующий графиту. Пикнометрическая плотность синтезированного образца составляет $5,09 \text{ г/см}^3$.
- Учитывая, что в исходной смеси использовалась сажа (содержание сажи составляло 3 масс. %), являющаяся рентгеноаморфной, то можно сделать вывод об образовании в процессе ЭТВ аллотропной модификации углерода в виде многослойного графита.
- Растворение углерода в расплаве Ni-Al может проходить по двум механизмам атомарного растворения с образованием раствора углерода в никеле (α -Ni) или равновесной эвтектики (α -Ni - Ni₃C) и диспергирования, то есть в образования в расплаве крупных частиц в виде отдельных структурных фрагментов на межфазной границе под влиянием адсорбционного понижения прочности, которые затем всплывают, образуя на поверхности расплава многослойную графитовую пленку.

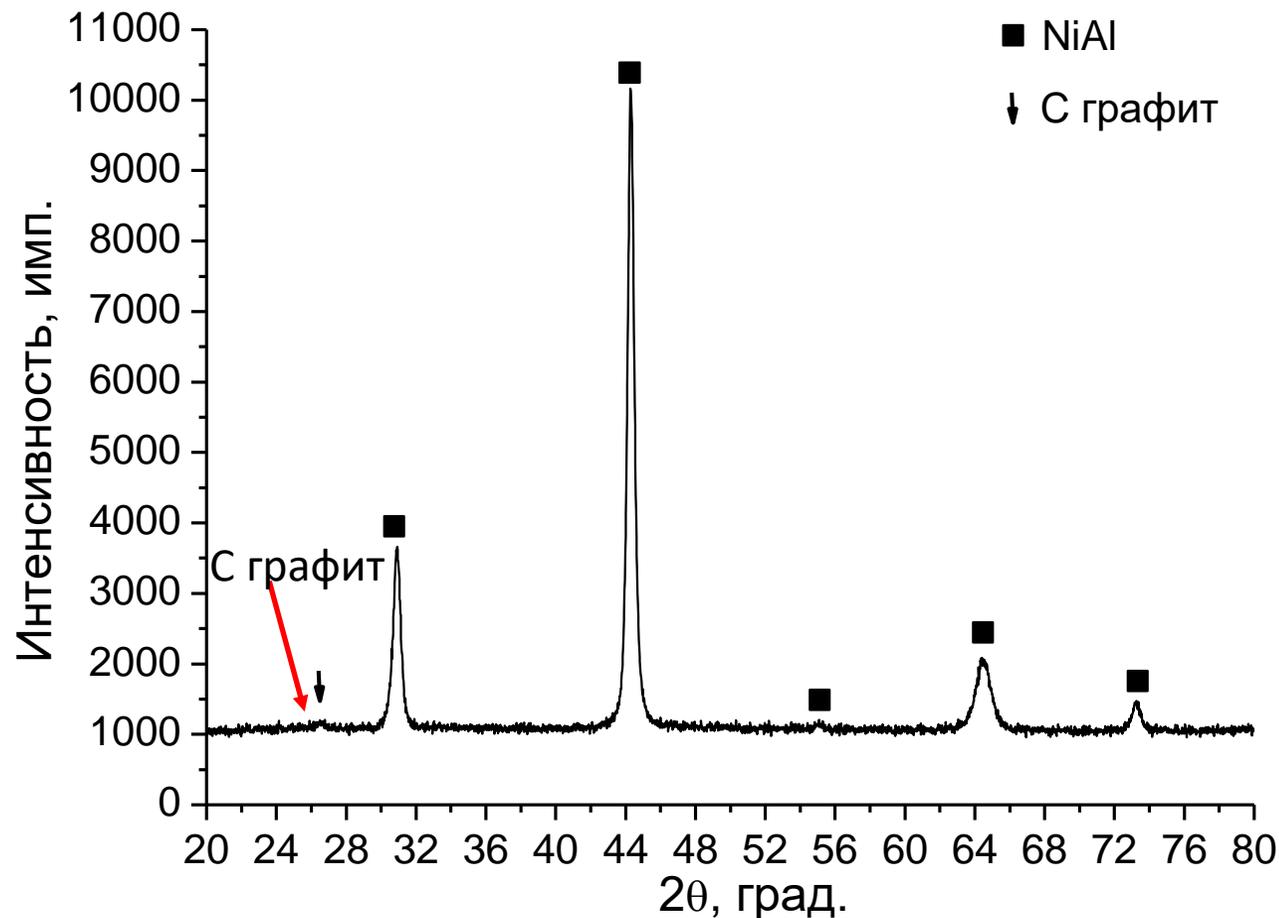


Рис.3. Рентгенофазовый анализ синтезированного композита Ni-Al-C.

Результаты микроструктурного анализа

На изломе синтезированных образцов наблюдаются характерные образования на основе многослойных пленок графита толщиной 50-80 нм, расположенные на поверхности и межзернном пространстве интерметаллидных зерен NiAl и частицы непрореагировавшей сажи (Рис. 4, 5). Интерметаллидные зерна NiAl имеют округлую форму. Микротвердость синтезированного материала в разных точках образца имеет среднее значение (при нагрузке 50 г) – 3084 МПа.

Учитывая, что в исходной смеси использовалась сажа, являющаяся рентгеноаморфной, то можно сделать вывод об образовании в процессе ЭТВ аллотропной модификации углерода в виде многослойного графита.

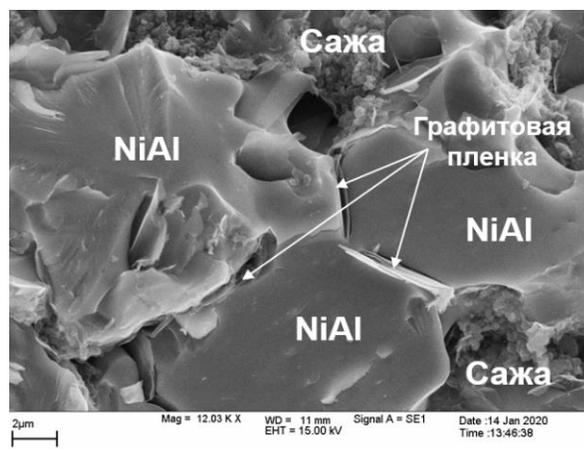


Рис. 4. Микроструктура излома синтезированного композита Ni-Al-C.

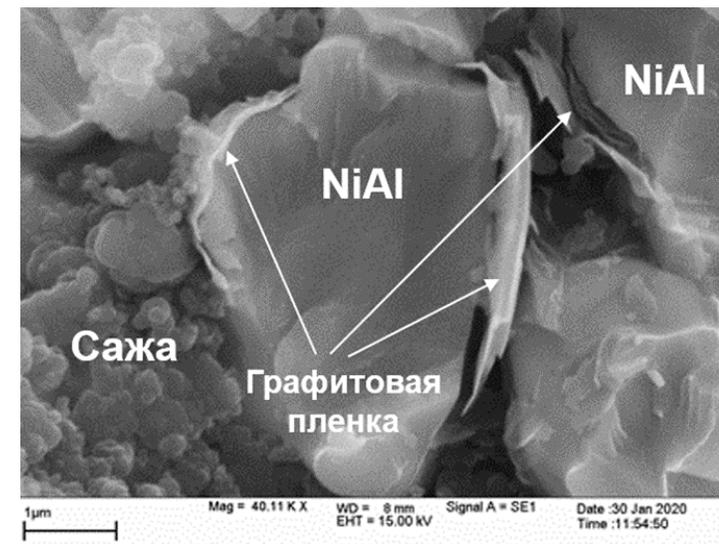
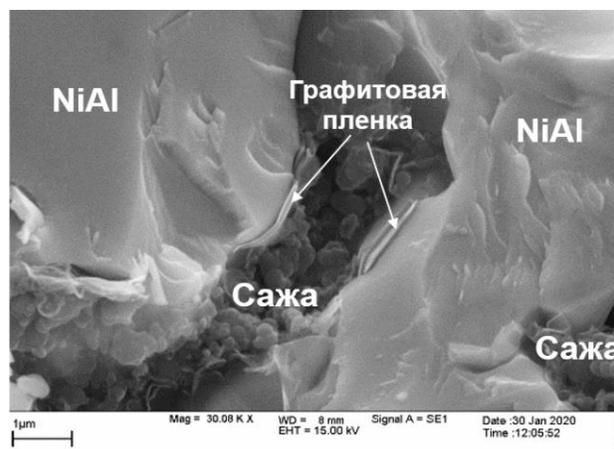


Рис. 5. Фрагмент структуры излома композита Ni-Al-C.