

УДК 621.791.14

**АНАЛИЗ СОБЫТИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ  
КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА  
МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Сугоняко И.С.<sup>1</sup>, магистрант гр. ММС-22-01, II курс

Туманова Е.Ю.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент УГНТУ

Научный руководитель: Имаев М.Ф.<sup>1,2</sup>, д.ф.-м.н., профессор УГНТУ,  
ведущий научный сотрудник ИПСМ РАН

(<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет  
г. Уфа)

Кабиров Д.Б.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник ИПСМ РАН

Хайретдинов Н.Ф.<sup>2</sup>, стажер-исследователь ИПСМ РАН

Фазлыхметов Р.Ф.<sup>2</sup>, к.т.н., научный сотрудник ИПСМ РАН

(<sup>2</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН  
г. Уфа)

Одним из способов повышения механических свойств алюминиевых сплавов является создание *in-situ* композита на их основе методом обработки трением с перемешиванием (ОТП). Для получения *in-situ* композита перед ОТП в заготовке вырезают канавки, которые заполняют порошком армирующих частиц металлов или их оксидов. Затем проводят многопроходную ОТП, в результате воздействия которой происходит химическая реакция между алюминиевой матрицей и армирующим порошком. Продукты реакции выполняют роль упрочняющих частиц.

В качестве армирующего порошка можно использовать NiO, в результате взаимодействия которого с алюминием в композите возникают упрочняющие наноразмерные частицы  $Al_3Ni$  и  $Al_2O_3$  [1]. Однако при проектировании объектов нефтегазовой отрасли необходимо учитывать не только механические свойства материалов, но и показатели надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость). Износостойкость является частным случаем безотказности материала, следовательно, увеличение износостойкости способствует повышению надежности изделия [2]. Согласно работе [3] образование частиц  $Al_3Ni$  и  $Al_2O_3$  в поверхностном слое алюминиевого сплава АА6061 при создании композита методом ОТП ведет к уменьшению износа поверхности металла при температуре 350 °С, что свидетельствует о повышении износостойкости *in-situ* композита при высоких температурах. В работе [4] определяли усталостную долговечность композита на основе алюминиевого сплава АА6063, армированного смесью  $ZrO_2$  и Ni, подвергнутого многопроходной ОТП. В композите, подвергнутом однократной ОТП, наблюдалось снижение усталостной долговечности по сравнению с основным металлом в связи с образованием крупных агломератов частиц  $ZrO_2$  и Ni, являющихся локальными концентраторами напряжений. Однако, композит, подвергнутый шестипроходной ОТП, продемонстрировал повышение усталостной долговечности на 95 % по сравнению с основным металлом. Данное явление связано с более

равномерным распределением мелких упрочняющих частиц в матрице металла и их способностью препятствовать распространению трещин при циклическом нагружении. По результатам наших исследований можно выдвинуть гипотезу о положительном влиянии армирующих частиц  $Al_3Ni$  и  $Al_2O_3$  на износостойкость и усталостную долговечность композита, подвергнутого ОТП.

Целью данной работы являлся анализ надежности *in-situ* композита на основе алюминиевого сплава АА6063 и NiO, полученного методом многопроходной ОТП. Для оценки надежности (долговечности и износостойкости) композита построили дерево анализа событий, влияющих на его формирование, по ГОСТ Р 27.302-2009 «Анализ дерева неисправностей». Известно, что образование в композите при ОТП высокой плотности наноразмерных упрочняющих частиц  $Al_3Ni$  и  $Al_2O_3$ , повышающих показатели надежности материала, всегда приводит к повышению микротвердости. Поэтому за критерий отказа системы принимается значение микротвердости композита, равное или близкое к значению микротвердости АА6063 без упрочняющих частиц после ОТП. Были выявлены базисные события, препятствующие получению *in-situ* композита требуемой микротвердости. В зависимости от причин возникновения базисные события были объединены в три группы [5]: связанные с материалом, с режимом ОТП и с оборудованием для ОТП. Дерево анализа причин получения композита с недостаточной микротвердостью представлено на рисунке 1.

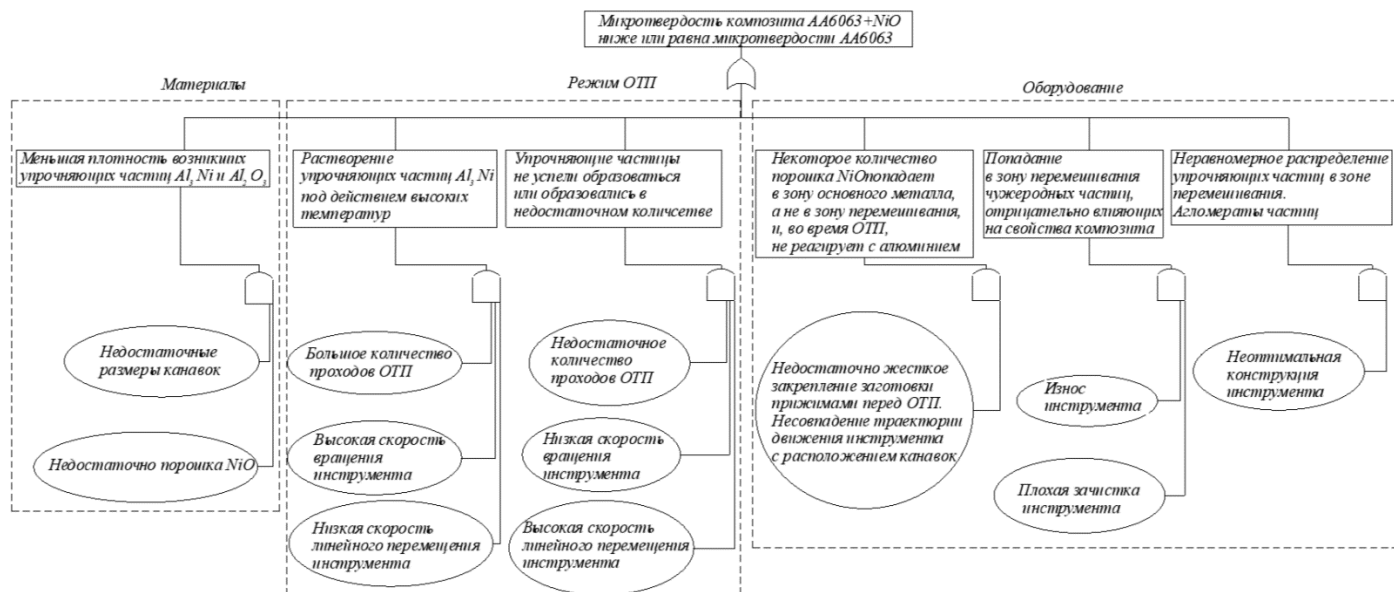


Рисунок 1 – Дерево анализа причин получения композита с недостаточной микротвердостью

Наиболее вероятными базисными событиями, приводящими к отказу системы, являются события, связанные с режимом ОТП:

1) недостаточность выделяемой при ОТП энергии для протекания реакции взаимодействия армирующего порошка с алюминием, и, соответственно, отсутствие упрочняющих частиц  $Al_3Ni$  и  $Al_2O_3$  в композите. Данное событие

происходит из-за недостаточного числа проходов ОТП, низкой скорости вращения и высокой скорости линейного перемещения инструмента.

2) растворение наноразмерных упрочняющих частиц  $\text{Al}_3\text{Ni}$  и образование крупных частиц  $\text{Al}_3\text{Ni}$  в результате коагуляции при высоких температурах (более 400 °C) [6]. Упрочнению композита способствуют лишь наноразмерные частицы  $\text{Al}_3\text{Ni}$ , соответственно, их растворение и образование крупных частиц оказывает отрицательное влияние на механические свойства и надежность композита. Данное событие происходит из-за слишком большого числа проходов ОТП, высокой скорости вращения и низкой скорости линейного перемещения инструмента.

### **Заключение**

Для обеспечения надежности композита на основе АА6063 и NiO необходимо соблюдение оптимальных режимов ОТП. Также на надежность композита влияют конструкция инструмента, его состояние и количество введенных армирующих частиц.

### **Список литературы**

1. Valeeva, A. Kh. Evaluation of the thermodynamic possibility of in-situ composites fabrication in aluminum-metal and aluminum-metal oxide systems through friction stir processing / A. Kh. Valeeva, M. F. Imayev // Letters on Materials. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 544-547. – DOI 10.22226/2410-3535-2021-4-544-547. – EDN MHAPVV.

2. Романов, И. О. О парадигме "надежность материала" / И. О. Романов, В. М. Макиенко, Я. А. Востриков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 152-159. – DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-15. – EDN EAIFWG.

3. Mehraban, F. A. Development of surface nanocomposite based on Al-Ni-O ternary system on Al6061 Alloy by friction-stir processing and evaluation of its properties / F. A. Mehraban, F. Karimzadeh, M. H. Abbasi // JOM. – 2015. – Vol. 67. – No 5. – P. 998-1006. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1383-y>

4. Patel M. Enhancement of tensile and fatigue properties of hybrid aluminium matrix composite via multipass friction stir processing / M. Patel, B. Chaudhary, J. Murugesan [et al.] // JOM. – 2022. – Vol. 21. – P. 4811-4823. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.073>

5. Бадертдинов, Д. Д. Анализ причин дефектов сварного шва, выполненного роботизированным устройством / Д. Д. Бадертдинов, Е. Ю. Туманова // Актуальные проблемы науки и техники — 2023 : XVI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, Уфа, 27–31 марта 2023 года / ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Том 1. – Уфа: Издательство «Нефтегазовое дело», 2023. – С. 175-177. – EDN XPHGSK.

6. Growth of  $\text{Al}_3\text{Ni}$  particles during friction stir processing of the АА6063+NiO composite / I. S. Sugonyako, D. B. Kabirova, N. F. Khayretdinov [et al.] // Letters on Materials. – 2023. – Vol. 13, No. 4(52). – P. 431-437. – DOI 10.22226/2410-3535-2023-4-431-437. – EDN XEPXNU.