

Исследование релаксации напряжений вследствие несоответствия коэффициентов теплового расширения матрицы и упрочняющих частиц в композитах на основе алюминия

О.В. Матвиенко^{1,2}, О.И. Данейко^{1,2}, А.П. Хрусталёв¹, В.Д. Валихов¹, И.А. Жуков¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Исследована релаксация термических напряжений в композитах Al–A356, упрочненных наночастицами SiC, Al₂O₃ и ScF₃. Предложена модель, учитывающая упругость частиц и вязкоупругость матрицы. Показано, что при 523 К напряжения релаксируют в течение 240 мин, становясь пренебрежимо малыми. С увеличением объемной доли упрочняющих частиц происходит увеличение термических напряжений. Этот факт связан с увеличением количества упрочняющих частиц в сплаве и, соответственно, с увеличением их вклада в упрочнение материала. При нагреве или охлаждении материала в результате несоответствия между коэффициентами теплового расширения и упругими константами матрицы и частиц термические напряжения увеличиваются. Установлено повышение предела текучести при нагреве и охлаждении материала.

Ключевые слова: деформации, релаксация напряжений, дисперсно-упрочненные материалы, наночастицы, напряжение, пластическая деформация, температурные напряжения, алюминий.

Введение

Дисперсно-упрочненные алюминиевые сплавы являются одними из передовых конструкционных материалов, разработанных для применения в аэрокосмической, оборонной, морской, а в последнее время и в автомобильной и транспортной отраслях. Это обусловлено превосходным сочетанием высокой удельной прочности и повышенной износостойкости. Эти сплавы обычно используются для изготовления компонентов двигателей внутреннего сгорания, таких как поршни и головки цилиндров, которые, как правило, работают при повышенных температурах.

Основными проблемами для этих компонентов при работе на повышенных температурах являются релаксация напряжений, а также ползучесть материала. Понимание и анализ этих явлений имеет определяющее значение при выборе материалов.

Испытания на релаксацию напряжений и ползучесть являются двумя наиболее широко используемыми экспериментальными подходами для определения поведения материалов со свойствами, зависящими от времени, при воздействии повышенных температур. В работе [1] исследованы характеристики усталостной прочности экспериментального дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия, полученного методом внутреннего окисления. Усталостные испытания проводятся при нагружении по «мягкой» схеме консольного изгиба вращающихся цилиндрических образцов в условиях симметричного цикла. Определен механизм зарождения и распространения усталостных трещин. Высокопрочные дисперсно-упрочненные сплавы Ag/Al с различным содержанием Al были исследованы в работе [2] в качестве кандидатов для оболочки проволоки Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} (Bi2212). Наблюдения за микроструктурой показали, что частицы Al₂O₃ играют главную роль в упрочнении дисперсно-упрочненного сплава Ag/Al. Сплав сохраняет свою мелкозернистую структуру и прочность после термообработки.

В работах [3] была предложена физическая модель пластической деформации. Моделирование пластической деформации и деформационного упрочнения основано на концепции, согласно которой пластическое скольжение в ГЦК-сплавах с некогерентными наночастицами приводит к образованию дефектной структуры со сдвигообразующими дислокациями, призматическими дислокационными петлями вакансионного и межузельного типов, дислокационными диполями вакансионного и межузельного типов, а также межузельными атомами, моновакансиями и бивакансиями.

Подход, сочетающий методы физики пластичности и механики деформируемого твердого тела, был использован в работе [4] для изучения пределов упругого и пластического сопротивления

* Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).