

Процессы получения и особенности структурообразования функционально-градиентных материалов

Лущик П.Е., Рафальский И.В.

Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

В работе выполнена систематизация и анализ процессов получения и особенностей структурообразования функционально-градиентных материалов (ФГМ), которые представляют собой инновационный класс композиционных материалов (КМ), состав, структура и свойства которых постепенно изменяются в заданном направлении.

Концепция ФГМ, разработанная японскими исследователями и активно развиваемая с 1984 г., характеризует качественно новый этап в развитии КМ, которые отличаются большим структурно-конструкционным разнообразием и могут включать разнородные материалы со значительно отличающимися физическими и химическими свойствами. В зависимости от назначения при получении КМ могут быть использованы металлические, полимерные, керамические материалы либо их комбинации – гибридные материалы. Важными характеристиками гибридных КМ являются их функциональные свойства (тепло- и электропроводность, коэффициент теплового расширения, повышенная стойкость к ударным воздействиям и др.). Обладая уникальным сочетанием различных свойств, гибридные КМ широко востребованы в аэрокосмической, автомобильной, атомной, горнодобывающей, спортивной, биомедицинской, электронной и других отраслях промышленности. Несмотря на преимущества перед традиционными материалами, КМ подвержены резкому изменению физико-механических свойств на границе раздела разнородных структурных составляющих, что может приводить к потере работоспособности изделия в условиях экстремальной эксплуатации. Этот недостаток устраняется получением модифицированной, функционально-градиентной структуры КМ с плавным и непрерывным переходом свойств от одного материала к другому.

Существующие технологии изготовления ФГМ интенсивно развиваются с целью обеспечения требуемого уровня эксплуатационных свойств изделий. В зависимости от структуры могут быть получены непрерывно-структурированные ФГМ с непрерывным градиентом от одного материала к другому или прерывисто-структурированные (дискретные) ФГМ, в которых градиент материала обеспечивается послойно. В зависимости от способа получения и пространственных характеристик, могут быть получены объемные (пространственные) материалы, а также пленочные и поверхностно-модифицированные ФГМ с тонкими функционально-градиентными покрытиями.

Получение ФГМ может быть реализовано с использованием широкого спектра технологий и оборудования, в том числе: электрохимического нанесения покрытий, физического и химического осаждения, газотермического напыления, наплавки и сварки, импульсного электрофизического воздействия, порошковой металлургии, химико-термической обработки, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, центробежного литья, аддитивных технологий 3D-печати и др.

Перспективным является применение комбинированных схем обработки материалов, используемых для получения многослойных гибридных ФГМ, обеспечивая возможность получения материалов с повышенными показателями прочности, износостойкости и стойкости к ударным воздействиям.

В настоящее время стойкость к ударным воздействиям КМ имеет исключительно важное значение в обеспечении структурной целостности конструкций и изделий, особенно, в автомобиле- и авиастроении, судостроении, атомной и военной промышленности, космических аппаратов, горнодобывающего и спортивного оборудования и др.

Высокими показателями свойств поглощения энергии удара, удельной прочности и низкой плотности обладают ФГМ с использованием тканевых и пленочных полимерных материалов (сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), пара-арамидное волокно

(кевлар), армированные стекловолокном (стекло-пластики) и углеродным волокном (углепластики) полимеры и др.). Однако ФГМ на основе полимерных материалов, как правило, не обеспечивают возможность эксплуатации изделий при повышенных температурах (СВМПЭ до 80-100 °С, стеклопластики на основе эпоксидных смол до 80-200 °С, полиимидов до 200-400 °С), а тканевые материалы в ряде случаев нестойки к истиранию, воздействию кислорода (углеволокно), УФ-излучению и воздействию влажной среды (кевлар).

Высокие показатели износостойкости, твердости, жаростойкости и тугоплавкости имеют ФГМ на основе керамических материалов, преимущественно, на основе оксидов (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 и др.), карбидов (WC , TiC , B_4C , SiC и др.), нитридов (TiN) и других керамических соединений. Однако принципиальными недостатками этих материалов являются хрупкость, трудность обработки, невысокая стойкость к ударным воздействиям, особенно в условиях циклического воздействия механических и термических ударов.

ФГМ на основе металлических (преимущественно, сплавы на основе железа, титана и алюминия) материалов обладают высокой стойкостью к ударным воздействиям, хорошей обрабатываемостью и механическими свойствами, в том числе при повышенных температурах. Сплавы на основе железа представлены, преимущественно, среднеуглеродистыми, среднелегированными сталями мартенситного класса, требуемые прочностные свойства которых достигаются, как правило, после закалки и низкого отпуска. При выборе состава и способа термической обработки стали требуется обеспечить сочетание высокой твердости, прочности, пластичности и ударной вязкости для предотвращения хрупкого разрушения материала. Металлические материалы на основе титана и алюминия представлены, преимущественно, высокопрочными марками сплавов. Существенным недостатком ФГМ на основе металлических материалов является более высокие удельная плотность и вес конструкций по сравнению с остальными типами ФГМ.

Значительным потенциалом свойств поглощения энергии удара и прочности при повышенных температурах обладают гибридные ФГМ на основе многослойных металлических (в том числе с использованием тканевых, сеточных компонентов и пеноматериалов) и металло-керамических материалов (на основе керамических соединений при различном содержании Co , Ni , Fe , Al , Ti и других металлов и сплавов), обеспечивающих возможность получения конструкций с повышенными показателями жаропрочности и стойкости к ударным воздействиям при общем снижении веса конструкций ФГМ. При разработке гибридных многослойных ФГМ перспективным является использование пористых, сотовых, ячеистых металлических материалов, а также биоинспирированных материалов и ауксетических структур с высокими свойствами поглощения энергии ударных воздействий.