

Кучик Владимир Юрьевич,
курсант 2 курса
Волчанин Александр Дмитриевич,
курсант 2 курса
Научный руководитель Гончарова С. В.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

МЕХАНИКА ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ: НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЧНОСТЬЮ И ДЕФОРМАЦИЕЙ

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и прикладные аспекты механики градиентных материалов как нового подхода к управлению прочностью и деформацией конструкций. Функционально-градиентные материалы (ФГМ), характеризующиеся непрерывным или квазинепрерывным изменением состава, структуры и механических свойств в одном или нескольких направлениях, противопоставляются традиционным слоистым композитам с резкими интерфейсами и высокими концентрациями напряжений.

Ключевые слова: механика градиентных материалов; функционально-градиентные материалы (ФГМ); распределенная прочность; градиент свойств; концентрация напряжений; механика разрушения; усталостная прочность; аддитивные технологии; оптимизация в пространстве функций; бронезащита; военная техника; живучесть конструкций.

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) характеризуются непрерывным или квазинепрерывным изменением состава, структуры и, как следствие, механических свойств в одном или нескольких направлениях. В отличие от традиционных слоистых композитов, где интерфейсы между слоями являются потенциально слабыми местами с высокой концентрацией напряжений, в градиентных материалах переход от одной фазы или структуры к другой «растянут» в пространстве. Это позволяет существенно снизить разрывы в жесткости, термических или упругих параметрах и, как следствие, уменьшить локальные напряжения, возникающие при механических и температурных нагружениях. Для военных приложений – бронезащиты, элементов корпусов боевых машин, защитных панелей и экранов – это означает возможность создавать конструкции с плавным переходом от твердого, твердосплавного или керамического наружного слоя (для противостояния пробитию и эрозии) к более вязкой и энергоемкой подложке, эффективно рассеивающей энергию удара и осколочного поражения.

С механико-материаловедческой точки зрения, градиентный материал можно рассматривать как сплошную среду с пространственно зависящими конститутивными соотношениями. Например, модуль Юнга $E(x)$, предел текучести $\sigma_u(x)$, коэффициент линейного термического расширения $\alpha(x)$

и вязкоупругие параметры могут быть заданы как функции координаты. Это приводит к существенному усложнению задачи: классическое уравнение упругости с постоянными коэффициентами превращается в дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами, а критерии прочности и долговечности становятся локально зависящими от координат. Тем не менее, подобный подход открывает принципиально новые возможности – переход от пассивного анализа «данного» материала к активному проектированию «распределенной прочности» в объеме. В военной инженерии это открывает путь к созданию «умной» бронезащиты, корпусов ракетно-артиллерийских систем, элементов ходовой части и силовых наборов, где распределение прочности и жесткости согласовано с ожидаемыми полями ударных, взрывных и циклических нагрузок. Рассмотрим, в качестве модельной задачи, одноосное растяжение плоской пластины, модуль упругости которой изменяется по толщине h по закону $E(z)$, где z – координата по толщине. При одинаковой средней деформации $\bar{\epsilon}$ распределение локальных напряжений $\sigma(z)=E(z) \cdot \epsilon(z)$ может быть принципиально иным, чем в однородном образце. Если структура материала спроектирована таким образом, что вблизи поверхности (где вероятно зарождение трещин и максимальные контактные нагрузки) модуль и предел прочности повышены, а в объеме – более низкий и пластичный материал, то возможна комбинация высокой поверхностной износо- и контактной прочности с повышенной общей трещиностойкостью. Механика градиентных материалов в этом случае формирует основу для оптимального распределения жесткости и пластичности в сечении. В военных конструкциях подобный подход применим, например, к бронированию корпусов боевых машин, лопастям вертолетов, элементам опорных катков и направляющих, где требуется одновременно обеспечить устойчивость к абразивному износу, ударным и баллистическим воздействиям и предотвратить хрупкое разрушение при перегрузках. Важным аспектом является поведение градиентных материалов в условиях сложного напряженного состояния и локальных концентраций напряжений, например вблизи надрезов, отверстий, острых переходов сечений. В классической механике материалов существует хорошо известный результат о концентрации напряжений вблизи отверстия в бесконечной плите при растяжении. В случае градиентного материала, когда в районе потенциально опасной зоны свойства изменяются целенаправленно (например, увеличивается пластичность или вводится зона с пониженной жесткостью, перераспределяющая усилия), пик напряжений может быть существенно снижен. Таким образом, проектирование градиента свойств может служить «встроенным механизмом» управления напряженным состоянием без изменения геометрии детали.

Для военной техники это особенно важно в районах крепления бронеплит, люков, амбразур, точек подвески вооружения, где наличие отверстий и вырезов неизбежно, а перегрузки и ударные импульсы – критичны для живучести конструкции. Еще одним уникальным эффектом механики градиентных материалов является возможность управления путями распространения трещин. В однородных материалах траектория трещины определяется локаль-

ным максимумом коэффициента интенсивности напряжений и симметрией поля напряжений. В градиентных средах, где трещина, продвигаясь, попадает в области с иными механическими характеристиками (более вязкими, более пластичными или, напротив, более хрупкими), возможны отклонения ее траектории, замедление или даже остановка. Проектируя пространственное распределение свойств, можно создавать «ловушки» для трещин, области с повышенной способностью к диссипации энергии разрушения. С точки зрения механики разрушения это означает переход от пассивной защиты к активному «направляющему» сопротивлению распространению повреждений. В военном контексте такие подходы могут применяться при проектировании многослойной и градиентной брони, корпусов артиллерийских систем, бронекансул экипажа, где важно не только предотвратить сквозное разрушение, но и локализовать повреждения, сохранив целостность и функциональность объекта. Отдельного рассмотрения заслуживает усталостная прочность градиентных материалов. Усталостное разрушение обусловлено накоплением микроповреждений при циклическом нагружении и во многом определяется локальными условиями вблизи поверхности и в критических зонах. В случае, когда свойства материала по мере углубления в толщу детали изменяются, возможен принципиально иной режим перераспределения напряжений и пластических деформаций по циклам. Например, при градиенте упрочнения от поверхности к объему пластина может демонстрировать более плавное распределение циклических деформаций, снижая локальную амплитуду напряжений у поверхности, тем самым увеличивая число циклов до зарождения и распространения усталостной трещины. Механика усталости в градиентных средах требует переопределения $S-N$ диаграмм (Wöhler-кривых) в виде локальных зависимостей, параметризованных координатой, и учета градиента свойств в моделях накопления повреждений.

Для военной техники это критично при проектировании элементов шасси гусеничных и колесных машин, лопастей и лонжеронов летательных аппаратов, стволов артиллерийских систем, подвергающихся многократным циклам нагружения и требующих повышенной усталостной выносливости при ограниченной массе. Интересную область приложений представляет сочетание механики градиентных материалов с аддитивными технологиями. Современные методы послойного выращивания позволяют варьировать не только геометрию изделия, но и состав, плотность, пористость, текстуру на каждом слое или даже в пределах слоя.

Это создает предпосылки для реализации проектов, в которых конструктор задает не только форму детали, но и пространственную функцию свойств $E(x)$, $\sigma_y(x)$, $KIC(x)$ (коэффициент трещиностойкости). Механика материалов здесь выступает как «инженер обратной задачи»: вместо традиционного подхода «заданы свойства – найти напряжения и деформации» формируется постановка «заданы желаемые поля напряжений/деформаций – найти распределение свойств, обеспечивающее их реализацию». В оборонной промышленности это открывает возможности для аддитивного изготовления сложнопро-

фильных силовых элементов, деталей вооружения и военной техники с заданными, в том числе по толщине и по длине, градиентами прочности, жесткости и ударной вязкости под конкретные сценарии боевой эксплуатации.

С математической точки зрения, подобная обратная задача является задачей оптимизации в пространстве функций. Требуется найти такое поле свойств $p(x)$ (куда могут входить модули, пределы текучести, параметры пластичности и др.), при котором функционал, характеризующий прочность, жесткость, массу, надежность или комбинацию этих критериев, становится экстремальным. Это, в частности, сближает механику градиентных материалов с топологической и топографической оптимизацией, но на новом уровне – уровне распределения характеристик материала при фиксированной геометрии. Для военных конструкций таким функционалом могут быть не только статическая прочность и масса, но и живучесть при поражающих воздействиях, стойкость к многоцикловым ударным и взрывным нагрузкам, а также способность конструкции сохранять работоспособность после частичного разрушения. Существенный интерес представляет также связь механики градиентных материалов с микроструктурным уровнем описания. Во многих современных материалах градиент структуры реализуется за счет изменения размеров зерен, содержания и распределения вторичных фаз, плотности дефектов и текстуры по сечению.

Например, в градиентно наноструктурированных металлах поверхностные слои имеют ультрамелкозернистую структуру (высокая прочность, повышенная усталостная выносливость), а внутренние объемы – более крупнозернистые (большая пластичность и трещиностойкость). Механика таких материалов требует согласования моделей сплошной среды с физикой дислокационного скольжения, зарождения и движения дефектов, переходов от хрупкого к вязкому разрушению на микромасштабе. В военных применениях это напрямую связано с проектированием броневых сталей, жаропрочных сплавов для двигателей, материалов для элементов вооружения, где сочетание высокой прочности и вязкости при различных масштабах структурных неоднородностей является ключевым условием надежности.

Практические приложения механики градиентных материалов охватывают широкий спектр задач: термостойкие элементы с плавным переходом от металла к керамике; износостойкие шестерни и валы с упрочненным поверхностным слоем и вязкой сердцевиной; биомедицинские имплантаты, в которых модуль упругости постепенно изменяется от поверхности к объему, чтобы лучше согласовать жесткость имплантата с костной тканью и снизить эффект «экранирования нагрузки»; элементы авиационно-космической техники, где сочетание градиента свойств и облегченной конструкции позволяет одновременно обеспечить высокую жесткость, устойчивость к термоциклированию и ударной нагрузке. В военной сфере к этому перечню добавляются: многослойные и градиентные бронесистемы для сухопутной техники; теплозащитные и эрозионно-стойкие покрытия для ракетной и авиационной техники; энергоемкие элементы корпусов, предназначенные для контролируемого

поглощения ударной энергии; а также структурные элементы вооружения и военной техники, требующие повышенной живучести при поражении и возможности длительной работы в условиях боевых нагрузок. Уникальность и перспективность механики градиентных материалов состоит в том, что она размывает традиционные границы между «материалом» и «конструкцией». В классическом представлении материал задается как некий набор свойств, а конструкция – как геометрия.

В градиентных объектах распределение свойств становится фактически частью конструктивного решения. Это требует от инженера нового типа мышления: проектирование идет не только в пространстве геометрических размеров, но и в пространстве функциональных полей свойств, согласованных с полями напряжений и деформаций в условиях реальной эксплуатации. Для военной техники это означает переход к интегрированному проектированию «материал–конструкция–функция–защита», когда требования по массе, защищенности, скрытности, живучести и ремонтпригодности учитываются уже на этапе задания пространственного распределения свойств материала в узлах и агрегатах вооружения и военной техники.

Список использованных источников

1. Miyamoto Y., Kaysser W. A., Rabin B. H., Kawasaki A., Ford R. G. *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*. – Springer, 1999.
2. Лихачев, В. А. Функционально-градиентные материалы: концепции, модели, приложения / В. А. Лихачев // Известия РАН. Серия физическая. – 2001. – Т. 65. – № 5. – С. 709–727.
3. Механика материалов : пособие / Ю. В. Василевич [и др.] ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Теоретическая механика и механика материалов». – Минск : БНТУ, 2022. – 181 с.