

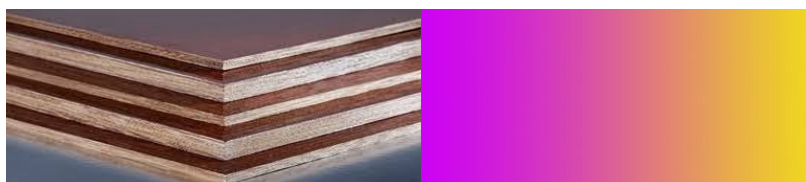
**ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. СОЗДАНИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ИЛИ ЕЕ РЕШЕНИЕ****А. А. Пинчук***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

*Дан аналитический обзор информации по новому направлению в материаловедении – разработке функционально градиентных материалов. Обоснована их целесообразность, выявлены проблемы и обозначены пути их решения.*

**Ключевые слова:** функционально градиентные материалы, металлы, сплавы, полимеры, композитные материалы, градация, консолидация.

Развитие современного машиностроения, авиационно-космической техники, электротехники и многих других областей постоянно требует создания новых материалов с экстремальными свойствами по прочности, твердости, легкости конструкций, пластичности и износостойкости металлорежущего инструмента, жаростойкости и долговечности конструкций миниатюрности и высокой электроемкости электронных компонентов. Конечно, многие задачи успешно решают композиционные материалы с различными наполнителями и функциональными добавками. Преимущества композиционных материалов являются очевидными и в то же время они достигаются сложными технологическими комбинациями для достижения совместимости компонентов. Такой успех отражается на стоимости материалов. И как оказалось, часто нет необходимости в использовании таких материалов во всей конструкции создаваемого объекта. Достаточно применение его только в данной функционально работающей области, например, износостойкий материал режущей кромки инструмента, жаропрочная обшивка космических аппаратов. Конечно, такую цель можно достичь путем создания слоистых материалов – композитных материалов с множеством слоев, выполняющих различные функции. Однако у таких материалов появляется недостаток, который перечеркивает все – разрушение материала может возникнуть раньше, чем будут реализованы уникальные свойства. Ресурс и непрерывная работа материала в экстремальных условиях эксплуатации, например, в области высоких температур или интенсивных упругих деформаций в условиях наличия четких границ раздела между отдельными компонентами, имеющими разные коэффициенты температурного расширения или величины модуля упругости, приводит к расслоению или трещинообразованию, сопровождаемыми разрушением композиционного материала. Места соединения слоев, их адгезия – это скопление деформаций, напряжений, дефектов и разрушение при эксплуатации происходит именно там.



а)

б)

Рис. 1. Структура композитных материалов:  
а – слоистый; б – градиентный

Концепция функционально градиентных материалов (ФГМ) – соединить несоединимое, используя преимущества каждого, реализуемая смарт-, нано- и высокоимпульсными технологиями, показала огромный потенциал в традиционных и современных областях применения конструкционных материалов. Такие материалы с пространственно неоднородной микроструктурой и градиентными функциональными свойствами востребованы в таких областях, как энергетика, керамические двигатели, газовые турбины, термоядерный синтез, оптоэлектроника, бронезащита и т. д. Экстремальные условия требуют материала с повышенной прочностью и одновременно пластичностью, прочного как металл и жаростойкого как керамика. Новый сплав с градиентной структурой неравномерно встроенных в кристаллическую решетку металла керамических частиц решает проблему – формирует внешний слой высокой твердости и более вязкий внутренний слой. Еще одна область – это медицина будущего, которая направлена на создание функционально градиентных биоматериалов, повторяющих особенности строения биологических объектов, наличием областей, имеющих различную структуру, а следовательно, и механические свойства, например, бедренного или коленного сустава, сердечного клапана, сухожилий или сосудов. При этом – это материалы без четкой границы раздела слоев, по которому обычно происходит разрушение.

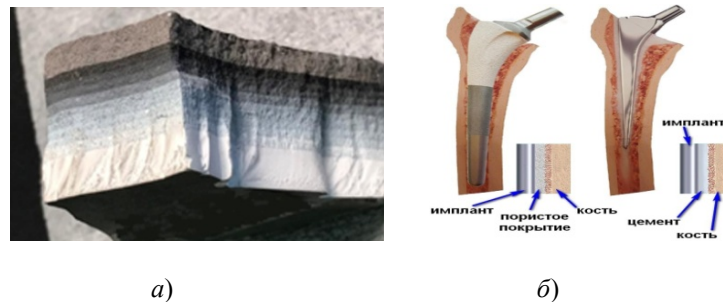


Рис. 2. Структура ФГМ биологического назначения (а), конструкция эндопротеза с использованием ФГМ (б)

Цель данной работы состояла в проведении анализа существующей информации в области разработки и применения ФГМ для оценки достоинств и недостатков этого нового направления, определения его целесообразности и значения.

Основанием для создания ФГМ являются наиболее широко известные материалы: металлы и сплавы, полимеры и композиты, керамика. Функционально градиентные материалы разрабатываются по приоритетному параметру: составу, структуре, виду и форме компонентов, однако, очевидно, что в конечном счете градиент материала выражается в свойствах, т. е. параметры (градиенты) – это аргументы, а свойства (градиенты) – это функция. Такая сложная взаимосвязь требует сначала на основании требований к свойствам материала задать величину градиента и его распределения в объеме материала, а затем аналитически связать это с вкладом каждого компонента. Необходимо отметить, что установление этих закономерностей и воспроизведение их в готовом материале представляет собой непростую задачу.

Чтобы решить вопрос о применении ФГМ в той или иной области необходимо взвесить достоинства и недостатки конкретных ФГМ, определить возникающие проблемы на пути не только их производства, но и эксплуатации.

При анализе преимуществ ФГМ на первое место, конечно, выходит возможность создания материалов с уникальными свойствами, позволяющими реализовать не только пионерские технические решения, но и воспроизвести материалы, созданные природой. Следующее – это экономное их расходование, так как ФГМ применяется только в востребованной области объекта, устройства, механизма, конкретно по месту работы.

Далее – проблемы. Получение ФГМ состоит из двух основных этапов: градации и консолидации. На каждом из этапов возникают принципиально разные проблемы. На первом этапе – это выбор технологии создания градиента. На втором – выбор технологии сохранения градиента.

Как показал обзор существующей информации, для градации – создания градиента предпочтительно использование высоко импульсных методов, которые требуют точности дозирования и управления энергетическими и силовыми потоками. Кроме того, применение их является затратным и небезопасным процессом. Для ФГМ материалов традиционного технического назначения применяются классические методы получения – формование, спекание, напыление, управляемые химические реакции (полимеризация, поликонденсация), осаждение дисперсных и волокнистых материалов. Исследуются возможности применения аддитивных технологий для получения ФГИ. Последние материалы не предназначены для эксплуатации в экстремальных условиях.

Сложнее оказался этап консолидации – сохранение созданного градиента. Наличие градиента это всегда термодинамически неустойчивое состояние объекта, что неизменно приводит к возникновению движущей силы, направленной к равновесному состоянию. В технологических процессах закрепления градиента возможно изменение структуры, фазового состава, образование новых химических соединений и в конечном счете – деградация.

В связи с этим идут интенсивные поиски новых, комбинированных, модифицированных методов как для создания ФГМ (использование дифференцированных, дисперсных, волокнистых, металлических, полимерных, неорганических материалов), так и закрепления их свойств (спекание отпуском).

Таким образом, определение преимуществ и проблем ФГМ поставили принципиальные вопросы в области их разработки и применения. Функционально градиентные материалы – приоритет или альтернатива, создание проблемы или ее решение?

Предъявляемые требования однородности структурных характеристик материалов, еще недавно очевидные и обоснованные для большинства изделий независимо от условий эксплуатации и характера функциональных нагрузок, больше не являются приоритетными. Во многих случаях наличие градиентной структуры материала позволяет разрабатывать материалы и изделия с новыми, ранее неизвестными и уникальными характеристиками. Проблемы, неизменно возникающие при разработке новых направлений в науке и технике, требуют своих решений, базирующихся на научных и практических результатах.

#### Литература

1. Градиентные полимерные материалы / А. А. Аскадский [и др.] // Обзор. журн. по химии. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 263–318.
2. Минько, Д. В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2020 – С. 450.
3. Функционально-градиентные материалы. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/197430176.pdf>.