

## **ГИБРИДНЫЕ УДАРОПРОЧНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ**

**П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук, **И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук  
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

*Рассмотрены основные механизмы процессов получения гибридных ударопрочных функционально-градиентных композиционных материалов на металлической основе (ГФГММО). Показано, что способы получения и свойства ГФГММО определяются характеристиками динамического воздействия на композиционный материал. Особое значение имеет правильный выбор градиента структуры и механических свойств ГФГММО по направлению к ударной нагрузке.*

**Ключевые слова:** функционально-градиентный материал, ударопрочность, структура, композиты.

## **HYBRID IMPACT-RESISTANT FUNCTIONALLY GRADIENT METAL MATERIALS**

**P.E. LUSHCHIK**, Ph. D in Technical Sciences, **I.V. RAFALSKI**, Ph. D  
in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»

*Fabrication and processing hybrid impact-resistant functional-gradient metal composite materials (HFGMC) are considered. It is shown that the methods of fabrication and the properties of HFGMC are determined by the characteristics of the dynamic effect on the composite material. Of particular importance is the correct choice of the gradient of the structure and mechanical properties of the HFGMC towards the impact load.*

**Keywords:** functional-gradient material, impact resistance, structure, composites.

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой инновационный класс материалов, у которых наблюдается изменение структуры, механических свойств или химического состава по глубине материала [1]. Для их изготовления применяются

различные монолитные или многослойные материалы (например, высокопрочные сплавы на основе железа, алюминия, титана, керамики) с градиентной структурой [2, 3].

Вызывают интерес исследования, связанные с разработкой ударопрочных многослойных композитов с градиентной структурой с применением разнородных материалов на металлической основе. Основные методы получения функционально-градиентных материалов на металлической основе (ГФГММО) определяются способом (маршрутом) технологической обработки материалов, используемых для их получения на этапе формирования неоднородной структуры (градации) композита, которые могут быть получены с применением конститутивных, гомогенизирующих и сегрегационных процессов [4]. При этом формирование градиентной структуры при получении ГФГММО осуществляется, как правило, с использованием трех и более разнородных компонентов.

Механизмы формирования ГФГММО при использовании конститутивных технологических маршрутов базируются на принципах послойного конструирования градиентной структуры и формировании прерывисто-структурированной (дискретной) градации многослойных композитов с выраженными межфазными границами раздела отдельных слоев композита. Эти механизмы основаны на принципах пространственного конструирования многослойных композитов, в том числе с использованием способов пластического деформирования металлических материалов (прессование, прокатка, штамповка и т. д.), разнообразных физических и химических методов нанесения поверхностных покрытий на металлические листы, методов порошковой металлургии (ПМ).

Механизмы формирования ГФГММО с использованием гомогенизирующих и сегрегационных маршрутов основаны на принципах формирования непрерывной градации структуры за счет процессов массо- и теплопереноса. Структурообразование непрерывно-структурированных ГФГММО с непрерывным градиентом реализуется в процессе гомогенизации межфазных границ раздела нескольких материалов в плавные градиентные переходы, как правило, по диффузионному механизму. Формирование непрерывно-градиентной структуры ГФГММО с использованием сегрегационных маршрутов основано на использовании различных внешних, в том числе высокоэнергетических, воздействий (электрического, магнитного, лазер-

ного и др.) на структурно-однородный материал, обеспечивающих его преобразование в градиентный материал.

Механизмы формирования ГФГММО с использованием распространенных методов ПМ основаны на широких технологических возможностях обработки порошковых смесей с применением различных маршрутов их спекания, в том числе под давлением. Существующие разнообразные методы получения и обработки порошков (химические, электролитические, механические и т. д.) обеспечивают массовое производство металлических порошковых материалов с заданными составом, физическими и технологическими свойствами. При этом формирование градиций порошковых материалов может осуществляться уже на стадии их подготовки и смешивания, варьирование гранулометрического состава обеспечивает образование заданного градиента пористости. Полученные методами ПМ композиты могут образовывать как непрерывные, так и прерывистые градиентные структуры.

В наибольшей степени требованиям получения ГФГММО с низкой стоимостью и возможностью обеспечения массового производства, в том числе крупногабаритных композитов сложной конфигурации, отвечают технологические процессы, в которых исходными компонентами при градации являются жидкофазные металлические материалы (расплавы), например, методы центробежного и седиментационного литья, направленного затвердевания. Несмотря на различие механизмов получения ГФГММО с использованием литейных методов (при центробежном литье материалы с различной плотностью формируют градиацию под действием центробежной силы, при седиментационном литье – под действием силы тяжести, при направленном затвердевании – при фазовом переходе из жидкого состояния в твердое при изменении температуры), все указанные методы обеспечивают образование только непрерывно-градиентных структур при использовании разнородных материалов, хотя бы один из которых находится в жидкофазном состоянии.

Конструкция и способы получения ГФГММО, стойких к ударным воздействиям, определяются характеристиками динамического воздействия на композиционный материал. Особое значение имеет правильный выбор градиента структуры и механических свойств ГФГММО по направлению к ударной нагрузке.

Установлено, что в случае разработки ГФГММО, стойких к высокоскоростным ударным воздействиям, градиция слоев материала должна обеспечивать повышающий градиент прочностных свойств и твердости и понижающий градиент вязкости по направлению от внутренней поверхности материала (тыльного слоя) к наружной. В случае применения материалов на основе железа (сталей) требуемый градиент свойств формируется выбором необходимых маршрутов термической обработки используемых материалов (закалка, отпуск, отжиг). Твердость наружного слоя однородного (гомогенного) материала (стали), как правило, повышается поверхностной закалкой.

Более широкие возможности для конструирования ГФГММО с требуемыми показателями поглощения энергии удара могут быть реализованы в случае использования комбинированных схем их получения и обработки материалов. Повышающий градиент прочностных свойств и твердости по направлению от внутреннего слоя к наружному в гибридных многослойных композитах на основе сталей, обеспечивающий повышенную стойкость к высокоскоростным ударным воздействиям, может быть сформирован при использовании методов высокоэнергетической термообработки поверхности (лазерной закалки).

В результате анализа свойств ГФГММО установлено, что использование в конструкциях многослойных композитов высокоэластичных материалов, установленных между слоями металлических материалов, взамен низкоэластичных материалов с высокой жесткостью, может обеспечить возможность существенного повышения стойкости к высокоскоростным ударным воздействиям. При этом предполагается, что характер деформации многослойного композита принципиально изменяется за счет перераспределения энергии высокоскоростного ударного воздействия между отдельными слоями.

Основной энергетической характеристикой динамического воздействия на металлическую пластину является кинетическая энергия движущегося тела

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2}. \quad (1)$$

Условием появления необратимых пластических деформаций в пластине, испытывающей внешнее воздействие движущегося тела, является соотношение

$$W_k > W_p, \quad (2)$$

где  $W_p$  – потенциальная энергия упругой деформации, величина которой прямо пропорциональна коэффициенту жесткости упруго-деформируемой пластины и квадрату его деформации:

$$W_p = \frac{k \cdot x^2}{2}. \quad (3)$$

При воздействии внешней силы  $F$  на металлическую пластину, чем меньше ее изгибная жесткость и больше упругая деформация изгиба, тем большую кинетическую энергию удара пластина может принять. Жесткость пластины выражается через параметры ее геометрии ( $L$ ,  $B$ ,  $H$  – длина, ширина и толщина пластины, соответственно) и коэффициент упругости материала пластины (модуль Юнга)  $E$  следующим образом [5]:

$$k = \frac{4 \cdot E \cdot B \cdot H^3}{L^3}, \quad (4)$$

и, следовательно, величина потенциальной энергии упругой деформации пластины при изгибе определяется

$$W_p = \frac{2 \cdot E \cdot B \cdot H^3}{L^3} \cdot x^2. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что применение конструктивных решений, обеспечивающих использование толстостенных и малоразмерных (по длине) листов из высокомодульных материалов и допускающих их существенную деформируемость (податливость) при воздействии ударной нагрузки, позволяет увеличить величину потенциальной энергии упругой деформации пластины при ее изгибе.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема конструктивного исполнения стойких к ударным воздействиям гибридных многослойных композитов с металлическими слоями из высокопрочных высокомодульных сплавов (на основе железа, титана и др.) с внутренними (промежуточными) слоями из высокоэластичных материалов. Приведенное конструктивное решение основано на представлении композита в виде многослойного пакета упругих элементов с низким коэффициентом жесткости, обеспечивающих большую величину упругой деформации металлических пластин при возрастании динамической нагрузки.

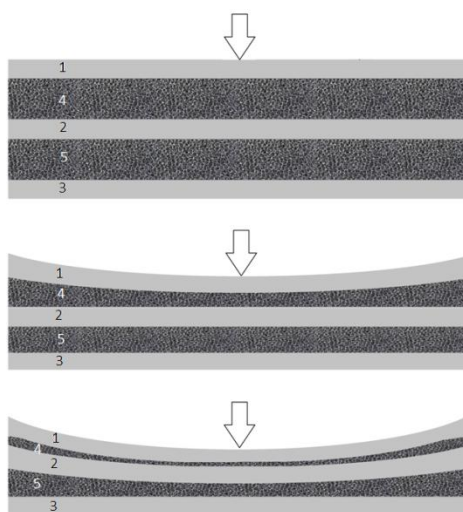


Рисунок 1 – Принципиальная схема конструктивного исполнения стойких к ударным воздействиям гибридных многослойных композитов с металлическими слоями (1–3) из высокопрочных сплавов и внутренними слоями (4, 5) из высокоэластичных материалов

Как видно из рисунка 1, верхний лист является первым слоем многослойного пакета, воспринимающего ударную нагрузку. В случае высокоскоростного воздействия материал воспринимающего нагрузку слоя должен обладать не только высокими упругими свойствами и деформируемостью, но и максимально возможной ударной вязкостью.

На основе данных о механических свойствах высокомодульных металлических материалов на основе железа наиболее перспективным представляется применение рессорно-пружинных сталей (ГОСТ 14959–2016). На рисунке 2 представлены зависимости, построенные путем аппроксимации полиномами 2-го порядка табличных данных, связывающими ударную вязкость, предел текучести, предел прочности и твердость конструкционной рессорно-пружинной стали 65Г [6] с параметрами их термической обработки (ТО).

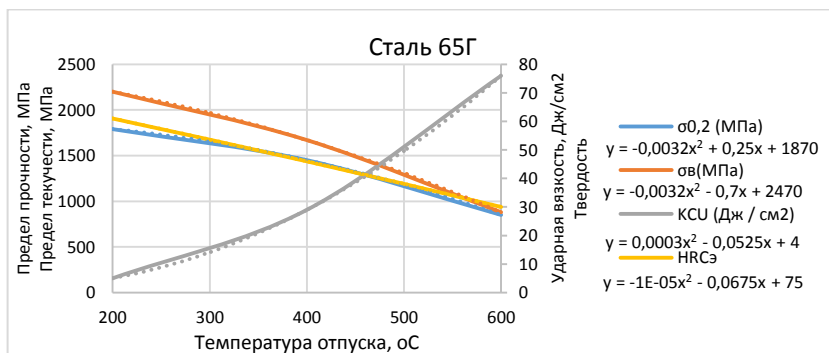


Рисунок 2 – Зависимости механических свойств конструкционной рессорно-пружинной стали 65Г от температуры отпуска после закалки 830 °С (по данным [6])

Как видно из рисунка 2, одним из важнейших факторов, оказывающим существенное влияние на прочностные и упруго-пластические свойства рессорно-пружинных сталей, является выбор режимов ТО. Варьируя параметрами ТО (в частности, температурой отпуска после закалки), возможно изменять ударную вязкость, предел текучести, предел прочности и твердость сталей в широком диапазоне значений, исходя из требований и условий эксплуатации композита.

Повышение стойкости к ударным нагрузкам рессорно-пружинных сталей позволяют также обеспечить различные виды поверхностной обработки пластин, в том числе нанесение защитных и упрочняющих покрытий, оксидирование (воронение), химико-термическая (азотирование) и лазерная обработка поверхности, наклеп (нагартовка) и др.

## Список литературы

1. **Гордиенко, А.И.** Разработка и применение функционально-градиентных материалов / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вевера // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого: научно-практический журнал. – 2007. – № 2. – С. 51–57.

2. **Bhavar, V.A.** Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications / V. Bhavar, P. Kattire, S. Thakare [et al.] // 4th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017 (229). – 9 p.

3. **Lia, W.** Research and Application of Functionally Gradient Materials / W. Lia, B. Han // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 (394). – 6 p.

4. **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. – 450 с.

5. **Радчик, А.С.** Пружины и рессоры / А.С. Радчик, И.И. Буртковский. – Киев: Техніка, 1973. – 120 с.

6. **Марочник** сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

## References

1. **Gordienko, A.I.** *Razrabotka i primeneniye funktsionalno-gradientnykh materialov* [Development and application of functional-gradient materials] / A.I. Gordienko, V.V. Ivashko, I.I. Vevera // Bulletin of GSTU named after P.O. Sukhoi: scientific and practical journal. – 2007. – No. 2. – P. 51–57.

2. **Bhavar, V.A.** Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications / V. Bhavar, P. Kattire, S. Thakare [et al.] // 4th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017 (229). – 9 p.

3. **Lia, W.** Research and Application of Functionally Gradient Materials / W. Lia, B. Han // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 (394). – 6 p.

4. **Minko, D.V.** *Teoriya i praktika polucheniya funktsionalno-gradientnykh materialov impulsnyimi elektrofizicheskimi metodami* [The-



ry and practice of obtaining functional–gradient materials by pulsed electrophysical methods] / D.V. Minko, K.E. Belyavin, V.K. Sheleg. – Minsk: BNTU Publ., 2020. – 450 p.

**5. Radchik, A.S.** *Pruzhiny i resory* [Springs and shock absorbers] / A.S. Radchik, I.I. Burtkovski. – Kiev: Tekhnika Publ., 1973. – 120 p.

**6. Marochnik** *staley i splavov* [Directory of steels and alloys] / V.G. Sorokin [et al.]; Under total. ed. V.G. Sorokin. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. – 640 p.

*Поступила 07.10.2021*

*Received 07.10.2021*