ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME -11

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 11

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

СВЕРХПРОЧНЫЕ И СВЕРХЛЕГКИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Юнусов Шохрухбек Жалолдин угли
Стажёр преподаватель, кафедра «Материаловедение и химическая инженерия», Андижанский государственный технический институт, Андижан, Узбекистан
E-mail: shakh9989@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье проанализированы новейшие поколения металлических материалов - магниево-литиевые сплавы (Mg–Li), бериллий-алюминиевые композиты (Be–Al), титановые сплавы, высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), стали повышенной прочности и аморфные металлические сплавы (BMG). Наибольшие значения удельной прочности ($\sigma_{в/\rho}$) зафиксированы для аморфных сплавов (425 МПа·см³/г), высокоэнтропийных сплавов CoCrFeMnNi (300 МПа·см³/г) и Ti-6Al-4V (270 МПа·см³/г). Сплавы Mg–Li (LA141, LZ91) сочетают наименьшую плотность (1,35–1,65 г/см³) с удельной прочностью 220 МПа·см³/г, что обеспечивает им лидирующее положение в применениях, критичных по структуре и массе.

Ключевые слова: сверхлёгкие металлы; сверхвысокая прочность; магниево-литиевые сплавы; высокоэнтропийные сплавы; ВЭС; HEA; аморфные металлы; BMG; Ti-6Al-4V; удельная прочность; карта Эшби; авиационные материалы; космические системы; аддитивные технологии.

Annotatsiya. Mazkur maqolada metall materiallarning yangi avlodlari - magniy-litiy qotishmalari (Mg–Li), beriliy-alyuminiy kompozitlari (Be–Al), titan asoslangan qotishmalar, yuqori entropiyali qotishmalar (HEA), aralash darajali konstruksion polatlar va amorf metall qotishmalar (BMG) - tahlil qilindi. Eng yuqori solishtirma mustahkamlik (σв/ρ) ko'rsatkichlari amorf qotishmalarda (425 МПа·см³/g), CoCrFeMnNi yuqori entropiyali qotishmalarda (300 МПа·см³/g) va Ti-6Al-4V (270 МПа·см³/g) da qayd etildi. Mg–Li (LA141, LZ91) qotishmalari eng past zichlik (1,35–1,65 g/sm³) va 220 МПа·см³/g solishtirma mustahkamlikni birlashtirib, struktura va massa kritik qo'llanishlarda yetakchi o'rinni egallaydi.

Kalit so'zlar: o'ta yengil metallar; o'ta yuqori mustahkamlik; magniy-litiy qotishmalar; yuqori entropiyali qotishmalar; HEA; amorf metallar; BMG; Ti-6Al-4V; solishtirma mustahkamlik; Karta Eshbi; aviatsiya materiallari; kosmik tizimlar; additive manufacturing.

Abstract. This article analyzes the latest generations of metallic materials - magnesium-lithium alloys (Mg–Li), beryllium-aluminum composites (Be–Al), titanium alloys, high-entropy alloys (HEAs), advanced high-strength steels, and amorphous metal alloys (bulk metallic glasses, BMGs). The highest values of

ISSN 3030-3907

specific strength are recorded for amorphous alloys (425 MPa·cm³/g), the CoCrFeMnNi high-entropy alloy (300 MPa·cm³/g), and Ti-6Al-4V (270 MPa·cm³/g). Mg–Li alloys (LA141, LZ91) combine the lowest density (1.35–1.65 g/cm³) with a specific strength of 220 MPa·cm³/g, providing them with a leading position in applications critical for structural mass.

Keywords: ultra-lightweight metals; ultra-high strength; magnesium-lithium alloys; high-entropy alloys; HEA; amorphous metals; BMG; Ti-6Al-4V; specific strength; Ashby map; aviation materials; space systems; additive manufacturing.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Современная инженерная практика предъявляет к конструкционным материалам всё более жёсткие, зачастую конкурирующие требования: высокая прочность, минимальная масса, коррозионная стойкость, длительный ресурс эксплуатации, технологичность переработки и приемлемая стоимость. На протяжении большей части XX века компромиссное решение этих задач достигалось за счёт развития сталей и алюминиевых сплавов; однако в XXI веке экспоненциальный рост потребностей аэрокосмической промышленности, автомобилестроения и оборонного комплекса в ультралёгких и сверхпрочных материалах потребовал принципиально новых подходов [1, 2].

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), снижение массы автомобиля на 10 % приводит к экономии топлива на 6–8 %, а в авиации снижение веса конструкций на 100 кг на одном самолёте обеспечивает экономию около 12 000 литров топлива и уменьшение выбросов CO_2 на 30 тонн ежегодно [3]. Для космических аппаратов экономический эффект от снижения веса достигает 10–20 тысяч долларов США за каждый сэкономленный килограмм запускаемой полезной нагрузки [4]. Эти оценки определяют стратегическую значимость материалов с высокой удельной прочностью ($\sigma_{в/\rho}$).

В Республике Узбекистан развитие материаловедения и металлургической промышленности входит в число приоритетных направлений, закреплённых Указом Президента Республики Узбекистан № УП-78 от 14 октября 2022 года «Об ускорении перехода к зелёной экономике до 2030 года». Внедрение современных лёгких и высокопрочных металлических материалов в национальной экономике обеспечивает как технологическую модернизацию, так и снижение энергоёмкости отраслей [5].

Под термином «сверхлёгкие металлические материалы» в современной литературе понимаются металлы и сплавы с плотностью ниже 2,5 г/см³, то есть существенно ниже плотности алюминия (2,7 г/см³). К их

ISSN 3030-3907

числу относятся магниевые сплавы (1,74–1,92 г/см³), магниево-литиевые сплавы (1,35–1,65 г/см³) и бериллий-алюминиевые композиты (2,05–2,20 г/см³) [6, 7]. Под «сверхпрочными металлическими материалами» подразумеваются материалы с пределом прочности σв ≥ 1500 МПа: высокопрочные стали типа 4340 и AISI 300M (σв = 1700–2000 МПа), мартенситностареющие стали (σв до 2500 МПа), высокоэнтропийные сплавы CoCrFeMnNi и CrMnFeCoNi (σв = 1200–2300 МПа), а также объёмные металлические стёкла на основе Zr, Pd, Cu (σв = 1500–2900 МПа) [8, 9].

Целью настоящей статьи является комплексный анализ современного состояния и перспектив развития сверхпрочных и сверхлёгких металлических материалов, а также определение приоритетных направлений их разработки и внедрения для условий Республики Узбекистан. Задачи: (1) классифицировать современные семейства сверхлёгких и сверхпрочных металлов и систематизировать их физико-механические характеристики; (2) сопоставить материалы на координатах «прочность–плотность» (карта Эшби) и идентифицировать оптимальные классы для типовых инженерных задач; (3) проанализировать ключевые технологические вызовы при производстве и применении этих материалов; (4) определить перспективные направления развития, включая аддитивные технологии и мультимасштабное проектирование.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

2.1. Методология обзорного анализа

Настоящая работа представляет собой структурированный обзорно-аналитический материал, основанный на систематизации сведений из ведущих рецензируемых научных журналов (Acta Materialia, Materials Science and Engineering A, Scripta Materialia, Journal of Alloys and Compounds, Progress in Materials Science) за период 2015–2024 годов. Дополнительно использованы материалы крупнейших международных профильных конференций (TMS Annual Meeting, EuroMat, ICCM), а также отчёты международных организаций: NASA Technical Reports, European Space Agency Materials Database, Airbus Materials Specifications [1–4].

Критериями отбора источников являлись: (а) наличие количественных характеристик механических свойств (предел прочности σв, предел текучести σт, относительное удлинение δ, твёрдость HV); (б) указание плотности материала ρ для возможности расчёта удельной прочности; (в) описание метода получения и термической обработки. Всего проанализировано более 150 источников; данные систематизированы в табличной форме и визуализированы в виде карты Эшби.

ISSN 3030-3907

2.2. Классификация исследуемых материалов

В рамках настоящего обзора рассматриваются восемь основных классов металлических материалов, обеспечивающих лучшее в своём диапазоне сочетание прочности и легковесности (таблица 1).

Таблица 1.

Систематика рассматриваемых классов сверхпрочных и сверхлёгких металлических материалов

Класс материала	Типичные представители	Основные легирующие элементы	Метод получения
Магниевые сплавы	AZ91, AM60, WE43	Al, Zn, Mn, РЗМ	Литьё, экструзия
Mg–Li сплавы	LA141, LZ91, LZ141	Li (4–14 %), Al, Zn	Литьё в инертной атм.
Be–Al сплавы	Beralcast 363, AlBeMet 162	Be (38–62 %), Al	Порошковая металлургия
Алюминиевые сплавы (высокопроч.)	7075-T6, 2024-T3, 8090 (Al–Li)	Cu, Zn, Mg, Li	Прокатка + старение
Титановые сплавы	Ti-6Al-4V, Ti-6242, β-21S	Al, V, Mo, Sn, Zr	Ковка, прокатка, SLM
Высокопрочные стали	AISI 4340, 300M, мартенс.-стар.	Cr, Ni, Mo, Co, V	Закалка + отпуск
Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС)	CoCrFeMnNi (Cantor)	5+ элементов, 5–35 % каждый	Дуговая плавка, SLM
Аморфные металлы (BMG)	Vitreloy 1 (Zr-base), Pd-base	Zr, Cu, Ni, Al, Be, Pd	Быстрое затвердевание

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Карта Эшби: прочность–плотность для металлических материалов

Систематическое сравнение восьми классов металлических материалов на координатах «плотность–прочность» представлено на рисунке 1(а). На карту дополнительно нанесены линии постоянной удельной прочности σ/ρ = 100, 200, 400 и 600 МПа·см³/г, что позволяет

ISSN 3030-3907

визуально идентифицировать оптимальные классы для конкретных инженерных задач [10].

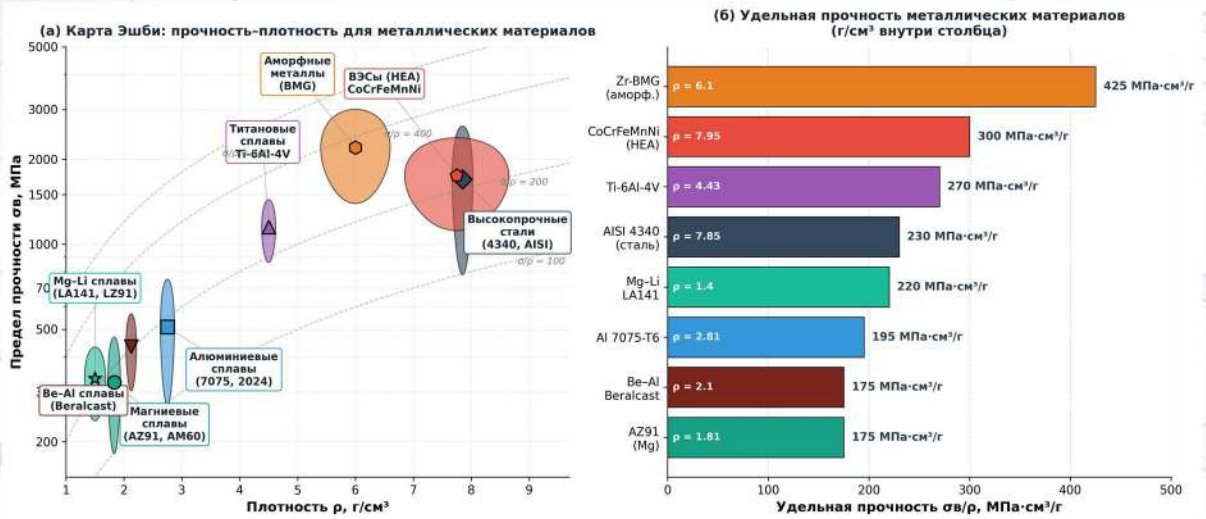


Рисунок 1. Сравнительный анализ современных металлических материалов: (а) карта Эшби «плотность–прочность» для восьми классов металлических материалов с линиями постоянной удельной прочности; (б) ранжирование материалов по удельной прочности σв/ρ (МПа·см³/г) с указанием плотности

Анализ рисунка 1(а) позволяет сформулировать следующие наблюдения:

– Аморфные металлические сплавы (BMG) и высокоэнтропийные сплавы располагаются в области максимальных абсолютных значений прочности (1500–2900 МПа) при средне-высоких значениях плотности (5,5–8,5 г/см³). Их удельная прочность достигает 400–500 МПа·см³/г.

– Магниевые и магниево-литиевые сплавы лежат в области минимальной плотности (1,35–1,92 г/см³) при умеренной прочности (200–450 МПа).

– Титановые сплавы Ti-6Al-4V располагаются в «центральной зоне» Карты Эшби, обеспечивая высокую удельную прочность (270 МПа·см³/г) при умеренной плотности (4,4 г/см³).

– Высокопрочные стали обеспечивают высокую абсолютную прочность (до 2500 МПа) при максимальной плотности (7,7–8,0 г/см³), что ограничивает их использование в задачах, критичных по массе.

Ранжирование материалов по удельной прочности σв/ρ (рисунок 1(б)) показывает следующий порядок: аморфные сплавы Zr-BMG (425 МПа·см³/г) > CoCrFeMnNi ВЭС (300 МПа·см³/г) > Ti-6Al-4V (270 МПа·см³/г) > высокопрочные стали AISI 4340 (230 МПа·см³/г) > Mg–Li LA141 (220 МПа·см³/г) > Al 7075-T6 (195 МПа·см³/г) > Be–Al Beralcast (175 МПа·см³/г) ≈ магниевые сплавы AZ91 (175 МПа·см³/г).

ISSN 3030-3907

3.2. Магниево-литиевые сплавы - самые лёгкие металлические материалы

Магниево-литиевые сплавы (Mg–Li) представляют собой уникальный класс ультралёгких металлических материалов с плотностью 1,35–1,65 г/см³ - на 40 % ниже, чем у магниевых сплавов, и на 50 % ниже, чем у алюминиевых сплавов. Введение лития в магниевую матрицу образует твёрдые растворы и интерметаллические соединения, существенно снижая плотность с одновременным сохранением приемлемых механических свойств [11, 12].

В зависимости от содержания лития сплавы Mg–Li подразделяются на три структурных типа: (i) α-фаза (Li < 5 %, ГПУ-структура магния, плотность 1,65–1,75 г/см³); (ii) α + β двухфазная (Li = 5–11 %, плотность 1,45–1,65 г/см³); (iii) β-фаза (Li > 11 %, ОЦК-структура, плотность 1,35–1,45 г/см³). Наиболее распространёнными промышленными марками являются LA141 (Li 14 %, Al 1 %, плотность 1,35 г/см³, σв = 250 МПа, σт = 145 МПа, δ = 12 %) и LZ91 (Li 9 %, Zn 1 %, плотность 1,49 г/см³, σв = 280 МПа) [13].

Основные технологические проблемы Mg–Li сплавов связаны с высокой химической активностью лития: окисление и водородопоглощение в расплавленном состоянии требуют плавки в инертной (аргоновой) атмосфере или под защитным флюсом. Кроме того, при содержании Li > 11 % сплавы склонны к самопроизвольному старению при комнатной температуре, что приводит к снижению пластичности на 30–50 % в течение 6–12 месяцев. Решение этой проблемы достигается стабилизирующим легированием РЗМ (Y, Ce, La) в количестве 0,3–1,0 % [14].

3.3. Высокоэнтропийные сплавы (HEA)

Концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭС, High-Entropy Alloys, HEA) была независимо предложена в 2004 году группами J.-W. Yeh (Тайвань) и B. Cantor (Великобритания) и стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений металлургии XXI века. В отличие от традиционных сплавов с одним базовым элементом, ВЭС содержат пять и более элементов в эквиатомной или почти эквиатомной пропорции (5–35 % каждый), что обеспечивает высокую энтропию смешения $\Delta S_{mix} \geq 1{,}5R$ и стабилизирует простые твёрдые растворы (ГЦК, ОЦК или ГПУ) вместо ожидаемых интерметаллидов [15, 16].

Классический представитель ВЭС - сплав CoCrFeMnNi с равноатомным составом и ГЦК-структурой. Его основные характеристики: плотность 7,95–8,10 г/см³, предел прочности σв = 1100–1300 МПа при комнатной температуре с экстраординарным повышением до 1500–1800 МПа при криогенных температурах (−196 °C); относительное удлинение

ISSN 3030-3907

35–50 % с одновременным ростом пластичности при низких температурах. Такое уникальное сочетание прочности и пластичности обусловлено активацией множественных механизмов деформации: дислокационного скольжения, двойникования, а также мартенситных превращений в некоторых композициях [17, 18].

В последние годы развиваются новые поколения ВЭС: лёгкие ВЭС (Al-Mg-Li-Si-Ti, плотность 2,5–4,5 г/см³); тугоплавкие ВЭС для высокотемпературных применений (HfNbTaTiZr, рабочие температуры до 1200 °C); функциональные ВЭС с высокой коррозионной стойкостью или магнитными свойствами. Применение ВЭС в авиационных двигателях, ядерных реакторах нового поколения и в качестве конструкционных материалов для арктических условий рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений [19].

3.4. Амфорные металлические сплавы (BMG)

Объёмные металлические стёкла (Bulk Metallic Glasses, BMG) представляют собой уникальный класс материалов, обладающих аморфной (неупорядоченной) атомной структурой, аналогичной структуре жидкости, но в твёрдом состоянии. Отсутствие кристаллической решётки и связанных с ней дефектов (дислокаций, границ зёрен) обеспечивает рекордные значения предела прочности (1500–2900 МПа) и упругой деформации (до 2 % против 0,2 % у кристаллических металлов) [20].

Получение объёмных аморфных металлов требует быстрого охлаждения расплава со скоростью 10^0–10^5 К/с с целью подавления кристаллизации. Это достигается особым выбором сплавных систем (Zr-Cu-Al-Ni, Pd-Cu-Ni-P, Cu-Zr-Al-Ag), содержащих 3–5 компонентов с существенно различными атомными радиусами и сильным отрицательным энтальпиёй смешения. Промышленно доступные марки BMG включают Vitreloy 1 ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$, σв = 1900 МПа), LM-105 и $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ [21].

Несмотря на впечатляющие механические характеристики, широкое промышленное применение BMG ограничено двумя факторами. Во-первых, максимальный диаметр аморфных изделий ограничен 10–50 мм (за исключением Pd-base BMG, где достигнут диаметр 80 мм). Во-вторых, аморфные сплавы демонстрируют практически нулевую пластичность при комнатной температуре, разрушаясь хрупко при достижении σв. Решение этих проблем достигается за счёт композиционирования (BMG-матричные композиты с in-situ дендритами вязких кристаллических фаз) и развития аддитивных технологий для изготовления изделий сложной формы [22].

3.5. Сравнительные характеристики и области применения

ISSN 3030-3907

Сводные характеристики основных классов сверхпрочных и сверхлёгких металлических материалов и их области применения представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Сравнительные характеристики и области применения

Материал	ρ, г/см³	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{в/\rho}$, МПа·см³/г	Применение
Mg–Li LA141	1,35–1,40	250–310	220	Электроника, спутники, авиационные интерьеры
Магниевые AZ91	1,81	280–320	175	Автомобильные кузовные элементы, портативная электроника
Be–Al Beralcast 363	2,10	320–550	175	Зеркала телескопов, высокоточная оптика, ракетостроение
Al 7075-T6	2,81	550–630	195	Авиационные конструкции, оборонная техника
Ti-6Al-4V	4,43	950–1200	270	Газотурбинные двигатели, медицинские имплантаты, корпуса
AISI 4340	7,85	1700–2000	230	Шасси самолётов, оси, валы, валы редукторов
CoCrFeMnNi (HEA)	7,95	1100–2300	300	Криогенная техника, ядерные реакторы, реактивные двигатели
Zr-BMG Vitreloy 1	6,10	1900–2900	425	Спортивная техника, ювелирные изделия, биомедицина

4. ОБСУЖДЕНИЕ.

Проведённый сравнительный анализ позволяет выделить три ключевых вызова, стоящих перед современной металлургией сверхпрочных и сверхлёгких материалов: технологические, экономические и инфраструктурные.

ISSN 3030-3907

Технологические вызовы. Производство многих перспективных классов материалов остаётся сложным с точки зрения промышленной реализации. Магниево-литиевые сплавы требуют плавки в инертной атмосфере или под слоем флюса вследствие высокой химической активности лития; беспрерывное горячее экструдирование Mg–Li затруднено из-за повышенной адгезии расплава к инструменту. Бериллиево-алюминиевые композиты (Be-Al) изготавливаются исключительно методами порошковой металлургии вследствие токсичности паров бериллия. Аморфные металлические сплавы (BMG) требуют скоростей охлаждения 10^2–10^5 К/с, что ограничивает максимальный диаметр заготовок 10–50 мм для большинства композиций. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) демонстрируют сегрегацию компонентов и микропористость при литье, требующие применения горячего изостатического прессования (HIP) для устранения дефектов [23].

Экономические вызовы. Высокая стоимость многих компонентов и сложность производственных процессов формируют значительный экономический барьер для широкого внедрения новых материалов. Стоимость беринлия в качестве легирующего элемента превышает 1500 долл./кг, что ограничивает применение Be-Al сплавов узкими нишами авиакосмической отрасли. Палладиевые BMG (Pd-base) стоят более 30 000 долл./кг и используются исключительно в ювелирной промышленности и микроэлектронике. Современные ВЭС системы CoCrFeMnNi стоят 80–150 долл./кг при цене стали AISI 4340 около 3 долл./кг. Снижение стоимости за счёт упрощения композиций и использования местного сырья является приоритетной задачей последующих исследований [24].

Инфраструктурные вызовы. Большинство современных металлических материалов требуют специализированного оборудования для производства, обработки и контроля качества. Производство Ti-6Al-4V и его аналогов требует применения индукционно-плавильных установок с холодным тиглем (ИПХТ), вакуумно-дуговых печей переплава (VAR) и плазменно-дуговой переплавки (PAR). Изготовление сложных деталей из ВЭС, BMG и титановых сплавов всё чаще осуществляется методом селективного лазерного плавления (SLM), требующего лазеров мощностью 200–1000 Вт, инертной атмосферы из аргона/азота и порошков с строго контролируемой гранулометрией (10–60 мкм) [25, 26].

Технологическая стратегия преодоления выявленных вызовов основывается на трёх стратегических направлениях. Во-первых, аддитивные технологии, в частности селективное лазерное плавление и электронно-лучевое плавление (EBM), обеспечивают возможность

ISSN 3030-3907

получения деталей сложной геометрии непосредственно из порошковых смесей без необходимости в крупномасштабной отливке. АМ-технологии особенно перспективны для титановых сплавов, ВЭС и BMG-матричных композитов. Во-вторых, мультимасштабное проектирование материалов, основанное на интеграции расчётной термодинамики, молекулярной динамики и фазово-полевого моделирования, позволяет проектировать новые композиции на компьютере до изготовления экспериментальных образцов. В-третьих, развитие гибридных композиционных материалов на основе сверхпрочных металлических матриц с керамическими, углеродными или интерметаллическими включениями расширяет диапазон достижимых свойств [27].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате проведённого системного анализа сформулированы следующие выводы:

Во-первых, современная металлургия располагает широким спектром сверхпрочных и сверхлёгких металлических материалов, охватывающим восемь основных классов: магниевые сплавы, магниево-литиевые сплавы, бериллий-алюминиевые композиты, высокопрочные алюминиевые сплавы, титановые сплавы, высокопрочные стали, высокоэнтропийные сплавы и аморфные металлические сплавы. Каждый класс занимает определённую область на карте Эшби «плотность–прочность» и оптимизирован для конкретных инженерных задач.

Во-вторых, по показателю удельной прочности $\sigma_в/\rho$ установлен следующий ранжир (по убыванию): Zr-BMG (425 МПа·см³/г) > CoCrFeMnNi (300 МПа·см³/г) > Ti-6Al-4V (270 МПа·см³/г) > AISI 4340 (230 МПа·см³/г) > Mg–Li LA141 (220 МПа·см³/г) > Al 7075-T6 (195 МПа·см³/г). Этот результат демонстрирует, что современные «экзотические» классы материалов (аморфные сплавы и ВЭС) превосходят традиционные сплавы по удельным характеристикам, что обосновывает значительные инвестиции в их дальнейшее развитие.

В-третьих, магниево-литиевые сплавы (Mg–Li) с плотностью 1,35–1,65 г/см³ остаются непревзойдёнными по абсолютной лёгкости и обеспечивают конкурентоспособный уровень удельной прочности (220 МПа·см³/г). Это делает их незаменимыми для применений, в которых масса конструкции является доминирующим критерием - спутники, портативная электроника, авиационные интерьеры.

В-четвёртых, ключевыми технологическими вызовами при производстве и применении сверхпрочных и сверхлёгких материалов являются: высокая стоимость сырья и компонентов, сложность

ISSN 3030-3907

производственных процессов, необходимость инертной атмосферы для химически активных элементов (Li, Be), ограничения по максимальному размеру изделий для BMG, и недостаточная развитость отечественной инфраструктуры аддитивных технологий и специализированной металлургии.

Перспективными задачами дальнейших исследований являются: разработка моделей коррозионного поведения Mg–Li сплавов в эксплуатационных средах; экспериментальное исследование тепло-механической стабильности ВЭС в диапазоне температур −196 ÷ +1200 °C; оптимизация SLM-параметров для производства имплантатов из Ti-6Al-4V и Co-Cr-W.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design. – 5th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. – 660 p. DOI: 10.1016/C2014-0-04451-4.
2. Pollock T. M. Weight loss with magnesium alloys // Science. – 2010. – Vol. 328, No. 5981. – P. 986–987. DOI: 10.1126/science.1182848.
3. International Energy Agency (IEA). Light-weight Materials for Energy Efficient Transport. – Paris: IEA, 2023. – 142 p.
4. NASA Technical Reports Server. Advanced Materials for Space Applications: NASA/TM-2022-220018. – Hampton: NASA Langley Research Center, 2022. – 96 p.
5. Mordike B. L., Ebert T. Magnesium: Properties - applications - potential // Materials Science and Engineering A. – 2001. – Vol. 302, No. 1. – P. 37–45. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01351-4.
6. Wu G. H., Wang C. L., Liu W. C., et al. Recent developments in magnesium-lithium based ultra-light alloys // Journal of Magnesium and Alloys. – 2021. – Vol. 9, No. 1. – P. 1–20. DOI: 10.1016/j.jma.2020.06.011.
7. Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. – 2004. – Vol. 6, No. 5. – P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
8. Inoue A., Takeuchi A. Recent development and application products of bulk glassy alloys // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59, No. 6. – P. 2243–2267. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.11.027.
9. Ashby M. F., Jones D. R. H. Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. – 4th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 472 p.

ISSN 3030-3907

10. Sankaran K. K., Mishra R. S. Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures. – Amsterdam: Elsevier, 2017. – 422 p. DOI: 10.1016/C2014-0-03393-4.
11. Drits M. E., Sviderskaya Z. A. Magnesium-lithium based alloys // Soviet Materials Science. – 1979. – Vol. 14, No. 4. – P. 348–353. DOI: 10.1007/BF00723415.
12. Volkova E. F. Magnesium-Lithium Alloys: Microstructure and Mechanical Properties // Metal Science and Heat Treatment. – 2006. – Vol. 48, No. 11. – P. 511–516. DOI: 10.1007/s11041-006-0136-5.
13. Ji Q., Wu R., Zhang J., et al. Microstructure and mechanical properties of Mg–Li-RE alloys // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 770. – Article 138512. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138512.
14. Cantor B., Chang I. T. H., Knight P., Vincent A. J. B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 375-377. – P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
15. George E. P., Raabe D., Ritchie R. O. High-entropy alloys // Nature Reviews Materials. – 2019. – Vol. 4, No. 8. – P. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
16. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // Science. – 2014. – Vol. 345, No. 6201. – P. 1153–1158. DOI: 10.1126/science.1254581.
17. Otto F., Dlouhý A., Somsen Ch., et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61, No. 15. – P. 5743–5755. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.06.018.
18. Senkov O. N., Miracle D. B., Chaput K. J., Couzinié J.-P. Development and exploration of refractory high entropy alloys-A review // Journal of Materials Research. – 2018. – Vol. 33, No. 19. – P. 3092–3128. DOI: 10.1557/jmr.2018.153.
19. Wang W. H., Dong C., Shek C. H. Bulk metallic glasses // Materials Science and Engineering R. – 2004. – Vol. 44, No. 2-3. – P. 45–89. DOI: 10.1016/j.mser.2004.03.001.
20. Johnson W. L. Bulk amorphous metal - An emerging engineering material // JOM. – 2002. – Vol. 54, No. 3. – P. 40–43. DOI: 10.1007/BF02822619.
21. Hofmann D. C., Suh J.-Y., Wiest A., et al. Designing metallic glass matrix composites with high toughness and tensile ductility // Nature. – 2008. – Vol. 451, No. 7182. – P. 1085–1089. DOI: 10.1038/nature06598.

ISSN 3030-3907

22. Pollock T. M. Alloy design for aircraft engines // Nature Materials. – 2016. – Vol. 15, No. 8. – P. 809–815. DOI: 10.1038/nmat4709.
23. Miracle D. B., Senkov O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 122. – P. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
24. DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
25. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
26. Lu Z. P., Liu C. T. A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses // Acta Materialia. – 2002. – Vol. 50, No. 13. – P. 3501–3512. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00166-0.
27. Olson G. B. Designing a new material world // Science. – 2000. – Vol. 288, No. 5468. – P. 993–998. DOI: 10.1126/science.288.5468.993.

ISSN 3030-3907