



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-142-158>
УДК 669

Поступила 30.11.2021
Received 30.11.2021

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

*А. А. ГЕТЬМАН, Военно-морской политехнический институт,
г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.a.getman@mail.ru*

Рассмотрены вопросы создания новых материалов с новыми свойствами, что приведет к принципиально новым конструкциям устройств и машин. В XXI в. материаловедение становится одной из главенствующих фундаментальных и прикладных наук, на которые опираются технический прогресс и дальнейшее развитие общества.

Ключевые слова. Развитие физики, химии для разработки новых материалов, технологии их изготовления.

Для цитирования. Гетьман, А. А. Основные направления развития материаловедения для создания новой техники / А. А. Гетьман // *Литье и металлургия*. 2022. № 1. С. 142–158. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-142-158>.

MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF MATERIALS SCIENCE FOR CREATING NEW EQUIPMENT

A. A. GETMAN, Naval Polytechnic Institute, Saint Petersburg, Russia. E-mail: a.a.getman@mail.ru

The issues of creating new materials with new properties, which will lead to fundamentally new devices and machines' designs, are considered. In the twenty-first century, materials science is becoming one of the main fundamental and applied sciences that support technological progress and the further development of society.

Keywords. Development of physics and chemistry for the development of new materials, their manufacturing technology.

For citation. Getman A. A. Main directions of development of materials science for creating new equipment. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 142–158. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-142-158>.

Современные знания науки о материалах – это результат теоретических и экспериментальных исследований, инженерных разработок, изобретений и открытий. Наука о материалах основывается на фундаменте физики, химии, механики, а также прикладных науках – металлостроения, черной, цветной и порошковой металлургии, изобретений и знаний о композитах, покрытиях, пленках, керамических материалах, синтетических монокристаллах, а также о технологиях получения материалов и изделий из них.

Необходимо отметить, что в XIX в. были сделаны не только основополагающие открытия, заложившие фундамент современного материаловедения, но и созданы научные школы, начали издаваться специализированные научные журналы, способствовавшие обмену идеями и результатами исследований. С учетом важности результатов работ в области материаловедения наметилось лидерство стран, таких, как Россия, Великобритания, Германия, Франция, Швеция. Начало XX в. было ознаменовано появлением нескольких выдающихся теоретических работ, изменивших мировоззрение и повлиявших на дальнейшее развитие науки. Речь идет в первую очередь о теории относительности и законе взаимосвязи массы и энергии А. Эйнштейна, открывших пути создания ядерных технологий.

К основополагающим научным направлениям XX в., определяющим прогресс материаловедения, и в наступившем XXI в. следует отнести:

- квантовую теории твердого тела, теорию реальных кристаллов и физику дефектов в твердом теле;
- теорию и экспериментальные достижения квантовой электроники;
- теорию сверхпроводимости и сверхпроводящие материалы;
- металлургию тугоплавких, легких, жаропрочных, прецизионных электротехнических сплавов;
- порошковую металлургию;
- физикохимию и технологию радиоактивных материалов;
- материаловедение полупроводников, диэлектриков, магнетиков;
- физикохимию и технологию оптических материалов;

- материаловедение композитов;
- химию и материаловедение полимеров;
- физикохимию и технологию соединения разнородных материалов (сварка, склеивание и т.д.);
- химию твердого тела, химию и физику поверхности, теорию и практику гетерогенного катализа;
- физикохимию и технологию сверхчистых материалов, монокристаллов, тонких пленок, аморфных, аморфнокристаллических, квазикристаллических, градиентных и направленно кристаллических материалов и покрытий;
 - экстремальные технологии в материаловедении (высокие давления, глубокий энергетический поток на материалы-плазма, лазерное излучение, электронный и плазменно-дуговой нагрев и перегрев, ионная имплантация и др.);
 - нанотехнологии в материаловедении;
 - компьютерное моделирование в материаловедении.

Реализация приведенных направлений была бы невозможной без создания принципиально новых методов и аппаратуры для исследования и характеристики разрабатываемых материалов и процессов их формирования.

Анализ развития металлургии выплавки стали свидетельствует о том, что если мировое производство стали в 1900 г. составляло 40 млн. т в год, то к 2010 г. оно достигло 1 млрд. 490 млн. т в год, а доля производства остальных металлов вместе взятых составляла лишь 150 млн. т в год, неметаллических материалов – примерно 180 млн. т в год.

Поэтому если строго следовать естественно-исторической классификации, мы живем в «железном веке», которому более 5 тыс. лет, и ничто не свидетельствует о том, что в обозримом будущем появится конкурент железу и его сплавам в качестве основного материала современной цивилизации. Металлургия черных металлов, несомненно, будет выполнять роль базовой отрасли материальной культуры планеты и в XXI в., но ее формы потерпят изменения.

Ярким примером является разработанная в ЦНИИТМАШе совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» и Ижорским заводом уникальная по своим возможностям малоуглеродистая низколегируемая сталь 15X2НМФА для корпусов атомных реакторов с эксплуатационным ресурсом 100 лет.

Конечно, на смену железу приходят его соперники – другие металлы, такие, как алюминий, титан, ванадий, цирконий и др., которые уже сейчас ведут массированное наступление на позиции железа.

Так, в ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны титановые сплавы для корпусов атомных реакторов подводных лодок, которые по комплексу физико-механических свойств, коррозионной и радиационной стойкости превосходят реакторные аустенитные и высоконикелевые сплавы.

Сплавы на основе титана обеспечивают высокую экологическую безопасность при длительной эксплуатации АЭУ и позволяют решать проблему обращения с радиоактивными отходами при утилизации АЭУ.

При этом следует учитывать, что титана в земной коре приблизительно 0,6%, т.е. в 10 раз больше чем $Mn+Cr+Cu+Zr+V+Ni+Co+Nb+W$ вместе взятых. Титан занимает четвертое место после алюминия, железа и магния по распространенности в земной коре.

Титан широко используется в ракетно-космической технике, судостроении, кораблестроении и транспортном машиностроении, где большую роль играют малая плотность в сочетании с высокой прочностью и сопротивляемостью коррозии. Оборудование из титановых сплавов характеризуется высокой долговечностью и низкими затратами на текущий ремонт.

Совершенствование технологических процессов производства и широкие перспективы применения титановых сплавов в различных отраслях позволяют с уверенностью утверждать, что они станут важнейшими конструкционными материалами ближайшего будущего.

Долгое время ванадий не находил широкого промышленного применения. Несмотря на то что ванадия в земной коре – 0,2% ($Ti \sim 0,6\%$), т.е. его в 15 раз больше, чем свинца, и в 2000 раз больше, чем серебра, руда, содержащая 1% ванадия, считается чрезвычайно богатой; промышленной переработке подвергаются даже те магнитные руды, где содержится всего 0,1% ванадия. Температура плавления ванадия – 1900 °С, $V=6,11 \text{ г/см}^3$. Ванадий имеет решетку ОЦКА $a=3,03 \text{ \AA}$, $\alpha=10 \cdot 10^{-6}$ град.

Сталь, легированная ванадием, имеет мелкое зерно, высокие коррозионные и механические свойства (удар, изгиб, износ, упругость и т.д.). Эти стали широко используются в кораблестроении, авиации, ракетной технике, железнодорожном и автотранспорте и т.д.

В будущем ванадий станет важнейшим конструкционным материалом.

То же относится и к цирконию, который имеет $T_{пл}=1850$ °С, $V=6,5$ г/см³, $\alpha=6,9 \cdot 10^6$ град, парамагнитен, а в земной коре его содержится больше, чем меди, никеля, свинца вместе взятых. Россия располагает 10% мировых запасов циркония. Цирконий имеет высокие механические свойства и наилучшую коррозионную стойкость, даже выше, чем тантал и титан.

Сталь, легированная цирконием, имеет мелкозернистую структуру, хорошую жидкотекучесть. Легирование медных, магниевых, алюминиевых сплавов цирконием приводит к существенному повышению их механических свойств и коррозионной стойкости.

Коррозионная стойкость сплава титана с 14% циркония в 5%-ной соляной кислоте при 100 °С в 70 раз выше, чем технически чистого титана. Цирконий вводят в марганцовистую латунь, алюминиевые, никелевые, свинцовые бронзы.

Нейтронная прозрачность циркония сделала его незаменимым материалом для оболочек ТВЭЛов. Цирконий и его сплавы широко используют в аэрокосмической технике, радиотехнических приборах.

Двуоксид циркония широко используют при получении высокоогнеупорных изделий для температур более 2500 °С. Производство циркония с каждым годом стремительно растет и он находит все новые и новые области применения.

Следует отметить, что к числу материалов будущего относится ниобий, имеющий температуру плавления 2468 °С. Сверхжаростойким является сплав ниобия с цирконием. Применение ниобия в ядерных реакторах указывает на то, что он является нейтронно-прозрачным, также имеет высокую температуру плавления, жаростойкость, коррозионную стойкость, отличные механические свойства.

Перспективным материалом ближайшего будущего является и бериллий, который по сравнению с другими легкими материалами обладает уникальным сочетанием физических и механических свойств. По удельной прочности и жесткости он превосходит все другие металлы (табл. 1).

Таблица 1. Удельная прочность бериллия по сравнению с другими материалами

Материал	σ_b , МПа	V , г/см ³	σ_b/ρ
Магниевый сплав МА 10	430	1,8	240
Алюминиевый сплав В 95	700	2,9	240
Титановый сплав ВТ6	1500	4,5	330
Сталь 03 Н8К9М5Т	1750	7,8	220
Бериллий	680	1,8	380

Благодаря высокому значению модуля упругости ($E=300$ ГПа) и низкой плотности бериллий по удельной жесткости превосходит все материалы, сохраняя это преимущество до температуры 500–600 °С. Бериллий отличается высокой электро- и теплопроводностью, приближающийся к теплопроводности алюминия, а по удельной теплоемкости превосходит все другие металлы. Бериллий имеет высокие ядерные характеристики – самое низкое среди металлов эффективное поперечное сечение захвата тепловых нейтронов и самое высокое поперечное сечение их рассеивания. Благодаря этому бериллий находит применение в атомной энергетике для изготовления отражателей, замедлителей и оболочек ТВЭЛов, так как обладает высокой теплопроводностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, сопротивлением ползучести. Несомненный интерес для физических полей ПЛ представляет звукопропускная способность этого материала. В воздухе скорость звука составляет 330 м/с, в воде – 1435 м/с, в стали – 4980 м/с, в бериллии звук побивает все рекорды, преодолевая за секунду 12500 м/с. Уникальные свойства бериллия в будущем будут способствовать увеличению спроса на этот металл.

Большое значение, особенно для ядерной энергетике, имеет литий – один из самых легких металлов. Высокая способность лития-6 (изотоп лития) захватывать медленные нейтроны легла в основу использования его в качестве регулятора интенсивности реакций, протекающих в урановых реакторах. Литий может быть использован и как горючее для ракетных двигателей.

Подсчитано, что в одном 1 км³ гранита заключено 112 тыс. т лития. Это в 30 раз больше, чем добывается его сегодня во всех странах. Наряду с литием в граните находятся ниобий, тантал, церий, уран, цирконий, цезий и многие другие редкие элементы.

Нет ни одной отрасли машиностроения, в которой в той или иной мере не использовали бы алюминиевые сплавы благодаря хорошему сочетанию их механических и физических свойств, низкой стоимости. Из всех легких сплавов алюминий характеризуется наибольшим объемом производства, занимающим второе место после производства стали, примерно 65 млн. т в год.

Широкое применение в будущем получат и такие сплавы, как сплавы с эффектом памяти формы, аморфные сплавы, которые и в настоящее время применяются в кораблестроении, космической технике.

Широкое распространение получат и сплавы с добавкой кобальта. Из трех наиболее ферромагнитных материалов – никель, железо, кобальт никель имеет точку Кюри 358 °С, железо – 768 °С, кобальт – 1130 °С.

Основным материалом, оказывающим определяющее влияние на уровень и конкурентоспособность промышленной продукции, является керамика. Это влияние сохранится и в ближайшем будущем. Войдя в технику и технологию в конце 60-х годов XX в., керамика произвела настоящую революцию в материаловедении, за короткое время став третьим промышленным материалом после металлов и полимеров.

Керамика стала первым конкурентоспособным материалом по сравнению с металлами для использования при высоких температурах. Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония. Классификация основных видов керамики приведена в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Характеристика основных видов керамики

Функциональный тип керамики	Используемые свойства	Применение	Используемые соединения
Механокерамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, КТР, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная антифрикционная, фрикционная, износостойкие детали	Si ₃ N ₄ , Zr, O ₂ SiC, Ti, O ₂ , ZnB ₂ , TiC, TiN, WC, B ₄ C, BN и др.
Термокерамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, КТР, теплоемкость	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка реакторов, теплообменники, теплозащита	Si, C, Ti, C, B ₄ C, TiB ₂ , ZrB ₂ , Si ₃ N ₄ , BeS, GeS, BeO, MgO, TiO и др.
Электрокерамика	Электропроводность, электроизоляционные свойства, диэлектрические свойства	Интегральные схемы, конденсаторы, вибраторы, зажигатели, нагреватели, термисторы, транзисторы, солнечные батареи, твердые электроплиты	BeO, MgO, ZnO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, B ₄ C, TiC, CdS, Si ₃ N ₄
Ядерная керамика	Радиационная стойкость, жаропрочность, жаростойкость, сечение захвата нейтронов, огнеупорность, радиоактивность	Ядерное горючее, футеровка реакторов, экранирующие материалы, поглотители нейтронов	UO ₂ , UO ₂ -PU O ₂ , UC, US, ThS, SiC, BeO

Широко используется магнетокерамика, оптокерамика, хемокерамика, биокерамика, сверхпроводящая керамика.

Исследование, проведенное Национальным бюро стандартов США, показало, что использование керамических материалов позволило осуществить экономию ресурсов страны более 3 млрд. долларов в год. Это было достигнуто за счет использования транспортных двигателей с деталями из керамики, керамических материалов для обработки резанием и оптокерамики для передачи информации. Кроме того, применение керамики позволяет снизить расход дорогих и дефицитных материалов: титана и тантала в конденсаторах, кобальта, хрома и никеля в двигателях. И все это, несмотря на то что керамические материалы плохо работают в условиях механических и термических ударов, при циклических нагрузках. В то же время следует знать, что керамические материалы обладают жаропрочностью, коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, их можно с успехом использовать в качестве элементов тепловой завиты.

К керамике специального назначения относится сверхпроводящая керамика для изготовления контейнеров с радиоактивными отходами, броневой защиты военной техники и тепловой защиты головных частей ракет и космических кораблей. Сопло ракетного двигателя из керамики работает 2500 ч при температуре 2500 °С.

Прогнозы развития материаловедения свидетельствуют также о том, что в ближайшие годы при создании новых композиционных материалов представляется реальным повышение их удельной прочности против современных материалов и сплавов в 10 раз, т.е. достижения $\sigma_b = 15\,000$ МПа, также значительное повышение их циклической прочности.

Создание композиционных материалов вообще открывает новую эру в технике, в том числе и в кораблестроении.

Переход на безотходную технологию производства деталей машин и приборов и создание новых материалов для таких областей новой техники, как атомная энергетика, кораблестроение, авиация и космос, микроэлектроника, прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, техника высоких давлений, высоких и низких температур связан именно с порошковой металлургией. Структура производства порошковой металлургии включает порошки железа, меди, латуни, бронзы, электролитические порошки никеля, кобальта, порошки Al и его сплавов, Ti, Mg, W, Pb, Au, Ag, Pz, Pd, Os и др.

Следует отметить, что в настоящее время возродился интерес к изучению поведения металлов под влиянием энергии взрыва, примененного в начале 60-х годов XX в. при сварке взрывом, которая уже используется в промышленности. Это позволило обнаружить, что высокие плотности энергии определяют область от твердого тела и жидкости до нейтрального газа, покрывая фазовые границы плавления и кипения, а также область перехода металл-диэлектрик.

Фундаментальные работы в области физики экстремальных состояний дадут новый импульс и в создании новых материалов, что убедительно подтверждено при проведении опытов с использованием ядерных взрывов с целью изменения свойств в экстремальных условиях, т.е. при давлениях до сотен миллионов атмосфер. Создание и получение новых материалов с новыми свойствами приведет к созданию и принципиально новых конструкций, машин и устройств военной техники.

Современные исследования показывают, что с помощью промышленных бактерий можно извлекать из земных недр медь, железо, цинк, никель, кобальт, титан, алюминий, уран, золото, германий, рений, галлий, индий, таллий и другие элементы, т.е. миллиарды крохотных «металлургов» трудятся, помогая получать необходимый металл. Нет сомнения, что в XXI в. использование микробов в гидрометаллургии сделает ее одной из ведущих отраслей промышленности.

В XXI в. материаловедение становится одной из главенствующих фундаментальных и прикладных наук, на которые опираются технический прогресс и дальнейшее развитие общества, где средства коммуникации, накопления и передачи информации и связанные с ними проблемы создания вооружения и новой техники приобретают особое значение.