От минералов к новым материалам. Приоритеты в производстве материалов в XXI веке

А. М. Асхабов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

askhabov@geo.komisc.ru

Посвящается памяти академика Л. А. Вайсберга

Рассмотрены характерные особенности поиска, производства и проектирования новых материалов в современных условиях. Обсуждается произошедшая смена парадигмы в производстве материалов, связанная с переходом от производства материалов на основе опыта к целенаправленному созданию материалов на основе знаний и новых технологий. В текущей повестке инновационного материаловедения – «умные» материалы и природоподобные технологии. Реальностью стали нанотехнологии, способные контролировать и управлять веществом и процессами в нанометровом масштабе. На основе анализа текущих тенденций указаны приоритеты нового этапа в производстве (творении) новых материалов. Серьезные прорывы ожидаются в следующих направлениях: 1) использование новых нанотехнологических идей, предполагающих прямое воздействие и операции над отдельными атомами; 2) создание «умных» материалов, материалов-приборов, материалов-машин; 3) изобретение, прогнозирование и дизайн новых материалов, отсутствующих в природе; 4) производство материалов в экстремальных условиях и материалов для эксплуатации в экстремальных условиях; 5) производство биоорганических материалов и материалов, воспроизводящих живое вещество; 6) развитие так называемых природоподобных технологий.

Ключевые слова: материалы на минеральной основе, инновационные материалы, нанотехнологии, творение материалов, материалы будущего.

From minerals to new materials. Priorities in the production of materials in the 21st century

A. M. Askhabov

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Dedicated to the memory of L. A. Vaisberg

The characteristic features of the search, production and engineering of new materials in modern conditions are considered. We discuss the change of paradigm in materials production, associated with the transition from experience-based production of materials to the task-oriented production of materials based on knowledge and new technologies. The current agenda of innovative materials science includes “smart” materials and nature-like technologies. Nanotechnology has become a reality, capable of controlling and operating matter and processes on the nanometer scale. The priorities of the new stage of production (creation) materials are indicated.

A great leap forward is expected in the following directions: 1) application of new nanotechnological concepts suggesting direct influence and action on separate atoms; 2) creating “smart” materials, materials – devices, materials – machines; 3) discovering, forecasting and design of new material absent in the nature; 4) producing materials under extreme conditions and for extreme conditions; 5) producing bioorganic materials and materials reproducing living matter; 6) developing so-called nature-like technologies.

Keywords: mineral-based materials, innovative materials, nanotechnology, material creation, materials of the future.

От полезных ископаемых и минералов к новым материалам

Академик Л. А. Вайсберг внес крупный вклад в развитие в нашей стране области науки и практики, связанной с исследованием процессов переработки и обогащения разнообразных видов твердого минерального сырья, которую в мире обозначают термином *mineral processing* [7]. Наука о переработке полезных ископаемых, очевидно, должна тесно взаимодействовать с другими фундаментальными науками — физи-

кой, химией, материаловедением. Последнее заслуживает особого внимания не только потому, что переработка минерального сырья зачастую преследует цель получения новых материалов, но и из-за того, что научно-технический уровень материаловедения как науки отражается на всей совокупности используемых в переработке сырья способов и технологических процедур. Кроме того, получение ценных материалов на минеральной основе — это одно из эффективных направлений рационального использования природного сы-

Для цитирования: Асхабов А. М. От минералов к новым материалам. Приоритеты в производстве материалов в XXI веке // Вестник геонаук. 2021. 9(321). С. 34–38. DOI: 10.19110/geov.2021.9.2.

For citation: Askhabov A. M. From minerals to new materials. Priorities in the production of materials in the 21st century. Vestnik of Geosciences, 2021, 9(321), pp. 34–38, doi: 10.19110/geov.2021.9.2.

рья. Эти обстоятельства побудили нас к подготовке настоящей заметки, в которой тезисно характеризуется современное материаловедение и перспективы его развития в части производства новых материалов, в том числе на минеральной основе. Обсуждаемая тема находится в русле сформировавшейся в последние годы актуальной проблемы «от минералов к материалам» [1, 14], транслирующей путь от полезных ископаемых к новым материалам. Поэтому мы полагаем, что приведенные здесь соображения о современных трендах в производстве материалов будут интересны как специалистам, которые рассматривают минералы как перспективные материалы, так и тем, кого минеральное сырье интересует больше как источник или основа получения новых материалов.

Материалы и производство материалов в жизни человека и истории человечества

Материалы и производство материалов сыграли огромную роль в формировании человеческой культуры и цивилизации. Потребность в материалах возникла, как только человек стал действовать осознанно. С помощью материалов он был способен увеличивать свои ограниченные возможности. И первые материалы, которыми он воспользовался, были минералами, горными породами или материалами на минеральной основе. В последующем целые исторические эпохи получа-

ли названия по преобладающему материалу — каменный век, бронзовый век и т. д. И такая связь человеческой цивилизации с материалами с веками только усиливалась. Материалы непосредственно влияли на жизнь человека. Перефразируя известное выражение, можно сказать: каковы были материалы — такова была и жизнь. Это побуждало его к поискам и производству все более ценных и разнообразных материалов.

В истории человечества материалы и производство материалов претерпели впечатляющую эволюцию, проходя через ряд последовательных ступеней и революций, в направлении от использования природных материалов до их целенаправленного создания (см. рисунок-коллаж, сделанный Н. Н. Пискуновой для этого сообщения).

Первая материаловедческая революция произошла, когда человек стал использовать одни материалы для производства других. В этих целях, естественно, использовались природные материалы. Технологии в большинстве своем воспроизводили природные. Новые материалы оставались минеральными или были получены на минеральной основе. Возможности природы долго были предметом подражания и зависти. Лишь в последние годы созданные человеком технологии получения новых материалов стали сопоставимы или даже стали превосходить природные. Это было вызвано тем, что резко возросли потребности науки, техники и новых производств в материалах со

Ступени удовлетворения нужд человека в материалах: от использования природных материалов до творения материалов по потребностям

Stages of satisfying human needs in materials: from use of natural materials to creation of materials according to the needs

специфическими свойствами. Произошла смена парадигмы в производстве материалов, что привело к новой революции в материаловедении. В результате характерное для прошлого производство материалов на основе опыта стало превращаться в целенаправленное создание материалов на основе знаний, в том числе и тех, которых не было в природе.

При этом минералы и другие полезные ископаемые остаются естественным ресурсом для получения новых материалов. Продолжают развиваться методы целевой переработки природного сырья и технологического модифицирования свойств минералов. До сих пор нередки примеры, когда тот или иной минерал из-за обнаружения новых свойств находит неожиданные применения и выступает как перспективный материал [14]. Даже хорошо известные нам минералы таят еще много неизвестных свойств, открытие которых резко повысит их материаловедческую ценность. В целом путь от полезных ископаемых к материалам человечеством еще до конца не обработан.

О новом этапе материаловедения и производства материалов

Происходящие в материаловедении, получении и использовании материалов изменения грандиозны. Достигнутые здесь успехи настолько велики, что мы переживаем очередную материаловедческую революцию, имеющую и важные культурные последствия, сравнимые с переходом от каменного века к бронзовому. Само материаловедение как наука изменилось, оно стало междисциплинарной областью, объединяющей химию, физику, а также биологию, связанную с живой природой (биомиметика). В разных странах появилось огромное количество материаловедческих центров, лабораторий. Издаются международные специализированные научные журналы (Advanced materials, APL materials, Journal of materials Science, Materials Today, Metamaterials, Progress in Materials Science и др.). Имеется обширная литература и на русском языке, в том числе монографические обобщения энциклопедического характера [6], учебные пособия [9], уже почти два десятилетия выходят книги серии «Мир материалов и технологий» [5, 8], в которых имеется огромное количество ссылок, необходимых для анализа современного состояния, обобщения и определения приоритетов науки о материалах. Мы ограничимся лишь ссылками приоритетного характера.

Возросли требования к материалам. Особенности современного этапа в получении новых материалов, в том числе и на минеральной основе, связаны с тем, что материалы перестают быть пассивными объектами. Мы постепенно переходим к поискам или созданию материалов для конкретных целей. На передний план выходят функциональные материалы [4], которые что-то «делают». Материалы приближаются к приборам, они все больше действуют как машины. В обиход вошли термины «умные материалы» и «природоподобные технологии». Материаловеды проектируют и обсуждают материалы, которые могут существовать, но ещё не открыты. Это вносит свои коррективы в разработку методов синтеза материалов (комбинаторные методы, матричная сборка и т. д.). «Умные» технологии должны решить проблему «догнать и обогнать природу».

Принципиальное значение в производстве материалов приобрёл фактор масштаба. Мы научились производить наноразмерные материальные объекты — нанокластеры и наноструктуры, реальностью становятся нанотехнологии, способные контролировать и управлять веществом и процессами в нанометровом масштабе [8, 12, 15]. В этом масштабе размеров стираются границы между материаловедческими и смежными науками. В процессах на наноуровне неразличимы те характеристики и свойства, которые на макроуровне изучаются физикой, химией, биологией и т. д., с чем связана уникальность наномира. Материаловедческое значение нанотехнологии заключается в том, что приемы и методы, которые там реализуются, формируют принципиально новую парадигму создания материалов. Возможности оперирования отдельными атомами и молекулами открывают неизвестные ещё пути конструирования материалов по методологии «снизу вверх». Перспективы нанотехнологий в производстве материалов, по общему признанию, представляются захватывающими. Однако реализация таких потенциально весьма эффективных подходов пока остается в области наших мечтаний. Это скорее разновидность инженерного творчества [8]. Мы и сегодня больше надеемся на прозорливость и удачу исследователя. Многие перспективные материалы, как и в старину, открываются случайно. Так, углеродные нанотрубки, которые сейчас рассматриваются как уникальный материал, не были предсказаны даже после открытия фуллеренов [11].

От века кристаллов к веку инновационных материалов

XX век вошёл в историю материаловедения как век кристаллов. Практически к середине века была решена грандиозная проблема обеспечения новых отраслей промышленности технически ценными кристаллами [2]. Созданы промышленные технологии получения кристаллов кварца, флюорита, сапфира, кремния, германия и т. д. Искусственно выращено также большинство драгоценных камней. Интересно, что соответствующие промышленные технологии кристаллосинтеза не всегда копировали природные процессы, что свидетельствует о том, что возможно обойти природу.

Однако примеров, когда природа помогает решать задачи получения новых материалов, гораздо больше. Поэтому многие продолжают видеть в природе непревзойденного инженера и учителя. Более того, это усиливающийся тренд в производстве новых материалов. Важно еще раз отметить, что природные материалы часто служат превосходными по эффективности матрицами для производства широкого класса новых материалов, в том числе так называемых фотонных кристаллов, биоподобных структур, а также вдохновленных природой архитектурных элементов в создании материалов.

В этом плане конец XX — начало XXI века характеризуется целым рядом выдающихся достижений. Так, удивительными свойствами обладают так называемые метаматериалы [16]. Они отличаются от природных материалов тем, что имеют отрицательный показатель преломления, и используются для покры-

тий, которые делают объекты невидимыми в лучах длинноволнового диапазона. На слуху опалы и опалоподобные матрицы, в которых путем заполнения другим веществом пространства между образующими их сферическими частицами создаются фотонные кристаллы и другие мезопористые материалы.

За последние годы синтезировано широкое семейство упорядоченных макро-, мезо- и нанопористых неорганических материалов на минеральной основе. В издательстве Springer подготовлена крупная монография по пористым материалам [13]. В зависимости от метода изготовления эти материалы имеют каналы или поры одинаковых размеров, которые расположены упорядоченно и формируют сотовую структуру. Они напоминают алюмосиликатные цеолиты, которые благодаря их пористому строению широко используются как катализаторы и молекулярные сита. Собственно, открытие нового класса мезопористых материалов произошло неожиданно, когда пытались создать новые типы цеолитов.

Нелишне напомнить здесь и об аэрогелях [10] — уникальных материалах с высокой пористостью и большой площадью поверхности. Их плотность практически близка к плотности воздуха. Первые образцы аэрогеля двуокиси кремния были получены 90 лет назад С. Кристлером, и в наши дни рассматриваются как перспективный инновационный материал. Аэрогели находят применение как высоко эффективные катализаторы, сорбенты, тепло- и звукоизоляторы и т. д. Для их получения чаще всего используются оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , TiO_2 и др.) и другие неорганические соединения. Аэрогели сейчас признаны как наиболее интересные и перспективные высокопористые материалы.

В настоящее время индустрия новых материалов переживает стремительное развитие. Лидировавшие до настоящего времени технологии получения искусственных минералов, кристаллов и кристаллических пленок уступают место производству нанокompозитов — композиционных материалов, состоящих из двух или большего числа фаз, в которых хотя бы одна из фаз состоит из частиц нанометровых размеров [4, 11]. Уникальные свойства демонстрируют нанокompозиты на основе фуллеренов, нанокompозитные материалы с нанотрубками, а также полимерные нанокompозиты на основе слоистых силикатов, глинистых минералов. Ассортимент наполнителей нанокompозитных материалов расширяется с каждым годом. Подбор таких модификаторов и наноразмерных добавок представляется перспективным направлением улучшения свойств композитных материалов.

Особое место обещают занять среди перспективных материалов будущего и сами недавно открытые формы углерода: фуллерены, нанотрубки, графены [11]. Например, углеродные нанотрубки, возможно, являются самыми прочными из всех созданных человеком материалов. А открытие графена в 2004 г. вообще стало сенсацией в научном мире. Это принципиально новый материал, представляющий собой единичный слой атомов углерода, самый плоский из всех возможных материалов.

Уникальные открытия ждут нас в связи с изучением и использованием отдельных минеральных моно- и полислоев атомов, двумерных кристаллов. На

этой основе открываются пути построения новых типов гетероструктур, мультислойных материалов, обладающих необычными свойствами.

Очень интересное направление в создании новых материалов с необычайно полезными свойствами связано с использованием молекул, построенных из так называемых суператомов — кластеров из атомов [3]. Они ведут себя как одиночные атомы, но построенные из них молекулы и сложные структуры совершенно уникальны как строительные элементы для новых материалов (суперматериалов из суператомов). Речь идет об атомах, которых не существует в природе. Молекулы из суператомов авторы предлагают рассматривать как «путь достижения большего, чем дает природа» [3]. И это вполне реально.

Таким образом, характерные черты современного, инновационного этапа развития технологического материаловедения связаны с переходом производства материалов на основе опыта к производству и проектированию материалов на основе знаний и новых технологий. Нет сомнения, что в технологии получения новых материалов открываются новые горизонты. Намечались неизведанные пути для дальнейшего прогресса в изобретении и дизайне материалов. Дорожная карта современного материаловедения позволяет надеяться на успешное удовлетворение все возрастающих требований к материалам со стороны электронных и информационных технологий, энергетики и медицины, оборонной промышленности, космических технологий и т. д. Нас ожидают поразительные изменения в фундаментальных основах производства материалов с необычными и полезными свойствами, в том числе получаемых на основе минералов и минерального сырья. В целом современная повестка в области производства новых материалов ориентирована на серьезные изменения во многих сферах жизни человечества и в человеческой цивилизации.

Приоритеты производства материалов в XXI веке

Безусловно, среди приоритетов нового этапа технологического материаловедения на ближайшую перспективу будут следующие направления, в рамках которых сегодня сосредоточены наиболее интересные проблемы, переводящие науку о материалах и технологии их производства на качественно иной инновационный уровень.

1. Использование фактора масштаба, новых нанотехнологических и наноинженерных идей, в том числе предполагающих прямое воздействие и операции над отдельными атомами, управление атомными процессами на поверхности.

2. Создание «умных» материалов и материалов для конкретных целей, включая материалы-приборы и материалы-машины, а также инфинитезимальные машины по Р. Фейнману [12].

3. Изобретение, прогнозирование и дизайн новых материалов, отсутствующих в природе. Создание наноструктурных материалов с наперед заданными свойствами. Производство функциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации.

4. Производство биоорганических материалов и материалов, воспроизводящих живое вещество (струк-

турную организацию живых организмов). Развитие так называемых природоподобных технологий, планомерный отход в создании материалов от упрощенных схем имитации природы в сторону использования готовых элементов, созданных природой, в том числе живыми организмами, в синтезе и дизайне материалов, включая биокопирование соответствующих структур.

Прогресс в этих направлениях, очевидно, требует и более глубокого понимания процессов взаимодействия атомов и молекул в наном мире на этапе образования ими самого конденсированного вещества (кристаллического или некристаллического, живого или неживого), функционирования и эволюции малых, формирующихся в этом мире объектов, приобретения или программирования ими тех или иных свойств. Это комплекс вопросов, сводящихся к фундаментальным проблемам — как произошло вещество (и не только минеральное) и как управлять этим процессом.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-05-00460/19.

Литература

1. Асхабов А. М. От минералов к новым материалам — дорожная карта минералогического материаловедения // Минералогия Урала: Сб. науч. статей VI Всерос. совещания. Миасс, Екатеринбург, 2011. С. 7—9.
2. Вильке К.-Т. Выращивание кристаллов. Л.: Недра, 1977. 600 с.
3. Джон Павлус. Супермолекулы из суператомов // В мире науки. 2017. № 1/2. С. 13.
4. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы / Под ред. Ю. Д. Третьякова. М.: Физматлит, 2010. 456 с.
5. Наноструктурные материалы / Под. ред. Р. Хинингса, А. Хилл. М.: Техносфера (Мир материалов и нанотехнологий), 2009. 488 с.
6. Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд. в 2-х т. Том 1. Основы науки о материалах. Киев: Наукова думка, 2008. 1146 с.
7. Основы геометаллургии / Л. А. Вайсберг, О. В. Кононов, И. Д. Устинов. СПб.: Русская коллекция, 2020. 376 с.
8. Пул Ч., Оуэнс М. Нанотехнологии. М.: Техносфера (Мир материалов и технологий), 2006. 336 с.
9. Сироткин О. С. Основы современного материаловедения. М.: Инфро-М., 2015. 362 с.
10. Смирнов Б. М. Аэрогели // Успехи физических наук, 1987. Т. 152, вып. 1. С. 133—157.
11. Терронис У., Терронис М. Новые формы углерода: Материалы XXI в. // Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. М.: Техносфера, 2011, С. 21—44.
12. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
13. Advanced Functional Porous Materials. From Macro to Nano Scale Lengths. Editors: Utahamon A., Thomas S., Li T., Maria H. Springer, 2022 (In press).
14. Depmeier W. From minerals to materials. In: Materials as Advanced Materials II (Ed. Sergey V. Krivovichev). Springer. 2012. P. 1—11.
15. Kulkarni S., Sulabha K. Nanotechnology: Principles and Practices. Springer, 2015. 379 p.
16. Simovski C., Tretyakov S. An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics. Cambridge University Press, 2020. 348 p.

References

1. Askhabov A. M. *Ot mineralov k novym materialam — dorozhnaya karta mineralogicheskogo materialovedeniya* (From minerals to new materials — a road map of mineralogical materials science). Mineralogy of the Urals, 2011. Proceedings of conference. Miass, Yekaterinburg, pp. 7—9.
2. Wilke K.-T. *Vyrashchivaniye kristallov* (Growing crystals). Leningrad: Nedra, 1977, 600 p.
3. John Pavlus. *Supermolekuly iz superatomov* (Supermolecules from superatoms). In the world of science, 2017, No. 1/2, p. 13.
4. Eliseev A. A., Lukashin A. V. *Funktsionalnyye nanomaterialy* (Functional nanomaterials). Ed. Yu. D. Tretyakova. Moscow: Fizmatlit, 2010.
5. *Nanostrukturnyye materialy* (Nanostructured materials) (Eds. R. Hinings, A. Hill). Moscow: Technosphere (Series "World of materials and nanotechnologies"), 2009, 488 p.
6. *Neorganicheskiye materialovedeniye* (Inorganic materials science). Encyclopedic edition in two volumes. Volume 1. Foundations of Materials Science. Kiev: Naukova Dumka, 2008, 1146 p.
7. *Osnovy geometallurgii* (Fundamentals of Geometallurgy). L. A. Vaisberg, O. V. Kononov, I. D. Ustinov. St. Petersburg: Russian collection, 2020, 376 p.
8. Poole Ch., Owens M. *Nanotekhnologii* (Nanotechnologies). Moscow: Technosphere (series "World of materials and technologies"), 2006, 336 p.
9. Sirotkin O. S. *Osnovy sovremennogo materialovedeniya* (Fundamentals of modern materials science). Moscow: Infro-M, 2015, 362 p.
10. Smirnov B. M. *Aerogeli* (Aerogels). *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Achievements of physical sciences), 1987, V. 152, No. 1, pp. 133—157.
11. Terronis U., Terronis M. *Novyye formy ugleroda: Materialy XXI v.* (New forms of carbon: Materials of the 21st century). In: *Uspekhi nanoinzhenerii: elektronika, materialy, struktury* (Advances in nanoengineering: electronics, materials, structures). Eds. J. Davis, M. Thompson. Moscow: Tekhnosfera, 2011, pp. 21—44.
12. Foster L. *Nauka, innovatsii i vozmozhnosti* (Nanotechnology. Science, innovations and opportunities). Moscow: Tekhnosfera, 2008, 352 p.
13. Advanced Functional Porous Materials. From Macro to Nano Scale Lengths. Editors: Utahamon A., Thomas S., Li T., Maria H. Springer, 2022 (In press).
14. Depmeier W. From minerals to materials. In: Materials as Advanced Materials II (Ed. Sergey V. Krivovichev). Springer. 2012, pp. 1—11.
15. Kulkarni S., Sulabha K. Nanotechnology: Principles and Practices. Springer, 2015, 379 p.
16. Simovski C., Tretyakov S. An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics. Cambridge University Press, 2020, 348 p.

Поступила в редакцию / Received 04.08.2021