

НАНОМАТЕРИАЛЫ: АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКАХ

М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев, Л.В. Пантеенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
61108, г. Харьков, Украина; e-mail: tikhonovsky@kipt.kharkov.ua*

Проведен компьютерный анализ публикаций, представленных в автоматизированной Международной материаловедческой Базе Данных Materials Science Citation Index, по проблеме компактных (консолидированных) наноматериалов. Рассмотрены информационные потоки по различным типам наноматериалов, методам их получения и исследуемым свойствам. Определен вклад основных стран в общее число публикаций по этим направлениям. Представлена информация о некоторых национальных и международных программах в области наноматериалов и нанотехнологий.

По мнению многочисленных экспертов, 21 век ознаменуется новой научно-технической революцией, связанной с так называемыми нанотехнологиями и наноматериалами. Хотя для понятия «нанотехнология», введенного, как известно, Ричардом Фейнманом в 1959 г., нет четкого однозначного определения, из аналогии с существующими ныне микротехнологиями следует, что нанотехнологии - это технологии, оперирующие величинами порядка нанометра. Другими словами, это технологии высочайшего уровня, позволяющие работать с небольшими группами атомов или молекул и даже с отдельными атомами. Основная идея нанотехнологии заключается в том, что практически любая химически стабильная структура может быть, если это не запрещено физическими законами, построена (собрана) искусственно путем соответствующей манипуляции с отдельными атомами или их группами. Поэтому переход от «микро» к «нано» — это уже не количественный, а качественный переход — скачок от манипуляции веществом к манипуляции отдельными атомами.

Возможности нанотехнологий представляются поистине неограниченными — от производства компьютеров с терагерцовой тактовой частотой до создания молекулярных роботов-врачей, которые «жили» бы внутри человеческого организма, предотвращая или устраняя все возникающие повреждения, включая повреждения генетические. (Кстати, термин наномедицина уже прочно вошел в международную практику — см., например, www.foresight.org/Nanomedicine/). Подробнее о перспективах нанотехнологий изложено в книгах [1-4].

Осознание стратегической важности исследований в этой области привело к тому, что в разных странах на уровне правительств и крупнейших фирм созданы и успешно выполняются программы работ по нанотехнологиям. Первые такие масштабные программы начали осуществляться в Японии, начиная с 1981 года (крупнейшим был проект «Aono

Atom Craft Project»). В ноябре 1995 г. в этой стране был принят закон, согласно которому в течение пяти лет (начиная с 1996 г.) государственное финансирование работ по нанотехнологиям составило 160 миллионов долларов. При этом финансирование из всех источников составляло от 95 до 150 миллионов долларов в год. Постепенно аналогичные проекты и программы «стартовали» в США и Западной Европе (общий объем финансирования этих работ в Японии, США и Западной Европе в 1997 г. составлял около 500 миллионов долларов).

В США отставание от Японии по темпам роста объема финансирования работ в области нанотехнологий стало предметом серьезного государственного обсуждения. В результате в 2000 г была сформирована «Национальная нанотехнологическая инициатива» (National Nanotechnology Initiative (NNI) - <http://nano.gov>). По решению правительства США работы по нанотехнологии получили высший приоритет, а при президенте страны организован специальный комитет, координирующий работы по нанотехнологии в крупнейших отраслях науки и промышленности. При этом объем государственного финансирования был увеличен в два раза. В дальнейшем это финансирование из года в год существенно возрастало (табл.1).

Европейские страны также своевременно поняли важность этих работ и в Шестой рамочной программе Евросоюза (2002-2006 гг.) исследования и разработки в области нанотехнологий были признаны приоритетными. На их финансирование в течение пяти лет предполагается затратить 1 млрд. 300 млн. евро (www.cordis.lu/nmp/whatis.htm).

В России в декабре 2002г. состоялась сессия Российской академии наук, посвященная вопросам нанотехнологий и наноматериалов (Вестник РАН, 2003 г, т.73, №5), где было принято решение о поддержке российских программ в этой области.

Объемы финансирования работ по нанотехнологиям (в млн. долларов) в рамках американской государственной программы NNI

Год	2001	2002	2003	2004 (запрос)
Финансирование	422	604.4	774	847

Следует отметить, что кроме государственного финансирования, которое в значительной мере направлено на развитие фундаментальных исследований, работы по нанотехнологиям финансируются фирмами, причем объем затрат со стороны фирм многократно превышает государственные вложения. Например, только фирма INTEL на разработки в области создания на базе нанотехнологий сверхбыстродействующих вычислительных устройств тратит более 1 млрд. долларов в год. Такая «щедрость» вполне понятна, если учесть, что по американским прогнозам мировой рынок нанотехнологической продукции через 10-15 лет составит около 1 трлн. долларов в год. При этом доля наноматериалов, которым посвящена данная статья, в этой продукции оценивается в 340 млрд. долларов [3-5].

Как и понятие «нанотехнология», термин «наноматериалы» (а также близкие по смыслу термины «наноструктурные материалы», «нанокристаллические материалы», «нанофазные материалы», «наноквантовые материалы») не имеет строгого определения. Первоначально Глейтер (см.[5,6]), который первым ввел в научную терминологию это понятие (как «нанокристаллические» материалы), основной упор сделал на решающей роли многочисленных поверхностей раздела в материалах этого класса, которые могут приводить к кардинальному изменению свойств материала (изложение истории развития работ по наноматериалам дано в работе[5]). Такие изменения вполне вероятны, если доля объема материала, приходящаяся на границы раздела, достаточно велика (50% и более). Эту долю можно оценить из соотношения $3s/L$, где L - размер зерен, а s - «ширина» границы. Если принять $s \approx 1$ нм, то для достижения высокой объемной доли границ (50%) размер зерен должен быть около 6 нм. В дальнейшем стало принято относить к наноматериалам такие материалы, у которых размер структурных составляющих (зерен, фаз и др.) не превышает ≈ 100 нм по крайней мере в одном измерении. Этот предел, разумеется, достаточно условен. Для конкретного физического свойства размер L необходимо соотносить с характерным расстоянием, контролирующим тот или иной физический процесс (например, размер петли Франка-Рида для скольжения дислокаций, размер доменов для магнитных свойств, длина свободного пробега электронов для электрокинетических характеристик, длина когерентности для сверхпроводящих свойств и т.д.). Однако, как показали многочисленные исследования, именно в области ниже нескольких сот нанометров наблюдаются значительные практически важные изменения свойств материалов (прочности, твердости, коэрцитивной силы и

др.). Подробнее о свойствах наноматериалов и особенностях протекания физических процессов в них сообщается в работах [3-6].

Поток работ в области разработки методов получения и исследования свойств наноматериалов нарастает лавинообразно. Проходит до 20 различных конференций в год (в частности, в 2004 г в Германии состоится уже 7-я крупнейшая Международная конференция по наноструктурным материалам-NANO 2004), издаются специализированные журналы (в частности — Nanostructured Materials). В тоже время значительная часть информации публикуется в традиционных материаловедческих и физических журналах. Для оценки тенденций развития исследований в данной работе сделана попытка проанализировать поток научной информации, опираясь на достаточно представительную автоматизированную Базу Данных Института Научной Информации США «Materials Science Citation Index» (MSCI, 1991-2002 гг.). Компьютерный анализ проводился по более чем тридцати ключевым словам и понятиям по следующим направлениям: типы наноструктурных объектов или материалов (металлы и сплавы; керамика; полупроводники; полимеры); методы получения наноматериалов (порошковая технология; пленочная технология; закалка из жидкого состояния и контролируемая кристаллизация из аморфного состояния; интенсивная пластическая деформация; механическое сплавление); свойства наноструктурных материалов (механические; магнитные; электрические или электронные; оптические или оптоэлектронные; химические или каталитические). Основным языком публикации, судя по данным БД MSCI, является английский, а основной тип публикаций – статьи в научных журналах.

Отметим, что мы намеренно исключили из анализа такие специфические нанометрические объекты, как углеродные нанотрубки, кластеры, нанопроволоки и др., сосредоточившись на рассмотрении «компактных» или «консолидированных» [3,5] материалов. Ниже приводятся и анализируются данные по отмеченным выше направлениям.

ТИПЫ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наибольшее число публикаций за 1991-2002 гг. (около 10 тысяч) посвящено изучению металлов и сплавов (рис.1 и табл. 2).

При этом явным лидером являются специалисты США (рис.2, табл. 2), опубликовавшие почти вдвое больше работ, чем находящиеся на втором месте ученые Японии. Обращает внимание относительно большое число польских публикаций, в особенности

по сравнению с Украиной (<1 %), традиционно считающейся сильной в разработке и исследовании металлических материалов. Частично это может объясняться недостаточно полным реферированием украинских материаловедческих журналов и в особенности трудов конференций в Базе Данных. Можно предположить также, что в сообществе украинских металлургов и металлофизиков термин «нано» не имеет большого распространения (вместо него иногда употребляют термины «ультрадисперсный», «сверхмелкозернистый» и др.) Однако такие объяснения вряд ли могут служить основанием для утешения.

Исходя из числа публикаций, вторым наиболее разрабатываемым наноструктурным объектом

(см. табл.2, рис.1) являются **полимеры** (3,5 тысячи публикаций). Здесь преимущество США еще более очевидно: так по числу публикаций они почти в 4 раза опережают Германию и Японию.

Третьим по интенсивности разработки объектом являются наноструктурные **полупроводники** (см. табл.2, рис.1). И в этой области США значительно опережают ближайших конкурентов. При этом отметим, что Германия опережает по числу публикаций Японию, в которой исследования полупроводников всегда занимали важное место. В области наноструктурной **керамики** ситуация несколько иная. Хотя и здесь США лидируют, их «отрыв» от Японии невелик (табл.2)

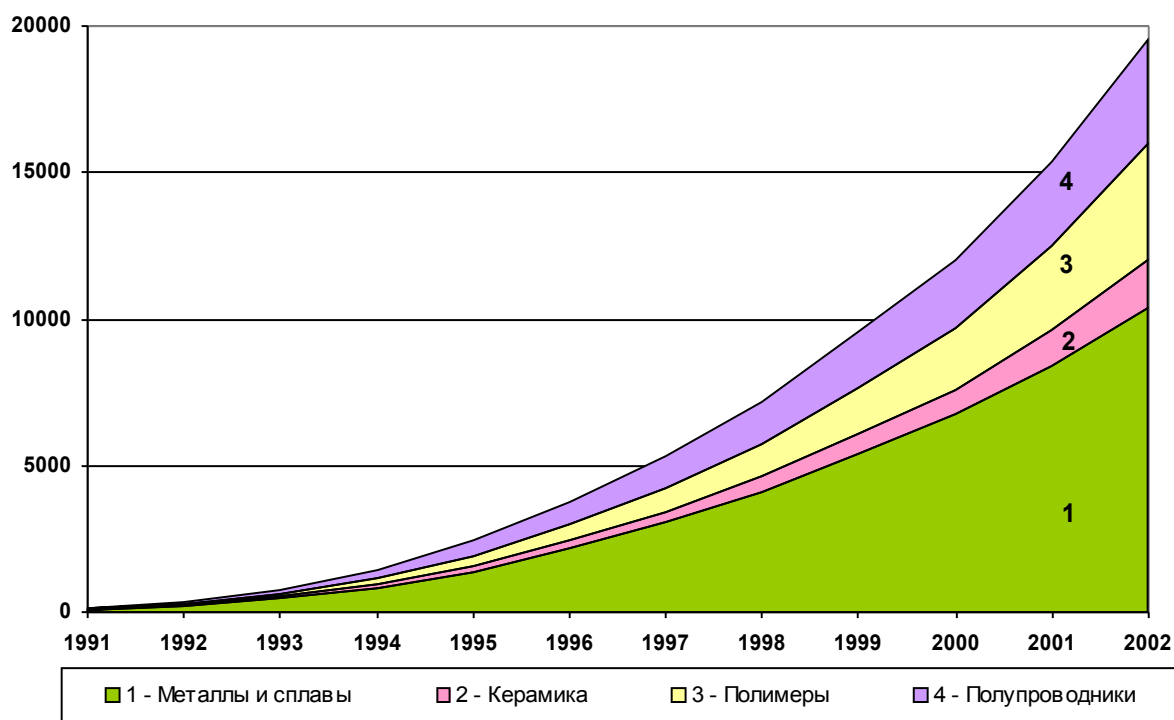


Рис.1. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991-2002 гг.) по различным типам наноструктурных материалов, рассматриваемых в настоящей статье

Таблица 2

Общее количество и распределение по некоторым странам публикаций по различным типам наноструктурных материалов в БД MSCI (1991-2002 гг.)

Тип материала	Общее число публикаций	Число обзоров	США	Япония	Германия	Россия	Польша	Украина
Металлы и сплавы	9998	214	23,6% (1)	13,8% (2)	11,2% (3)	6,2% (5)	2,7% (9)	<1% (24)
Полимеры	3509	280	37,2% (1)	10% (3)	10,2% (2)	4,9% (5)	<1% (17)	<1% (26)
Полупроводники	3323	107	34,4% (1)	11,0% (3)	12,5% (2)	4,6% (5)	1,2% (16)	1,1% (17)
Керамика	1597	33	21,1% (1)	16,7% (2)	13,3% (3)	4,1% (5)	1,0% (15)	0,8% (19)

Примечание. Здесь и далее в таблицах в скобках указано место, которое страна занимает по числу публикаций.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Основные методы получения наноматериалов, рассматриваемых в предыдущем разделе, представлены в табл. 3 [5]. В ней мы добавили механическое сплавление или легирование (mechanical alloying). Этот метод по характеру объекта (порошки) может быть отнесен к порошковому методу, а по способу воздействия (высокоэнергетический помол разнородных порошков) - к методу интенсивной пластической деформации. Однако для прослеживания тенденций развития работ в области наноматериалов нам представляется целесообразным рассмотреть этот метод отдельно (тем более, что в работе [5], как и в ряде других известных нам работ этот метод вообще никак не упоминается).

Порошковая технология. Порошковый метод первоначально был реализован Глейтером в виде сочетания изготовления ультрадисперсных порошков испарением и конденсацией в вакууме с последующим прессованием порошков без разгерметизации камеры (см.[5]). В последующем были предложены различные методы компактирования (см. табл.3). В изучении процессов получения нанопорошков и их компактирования лидирующая роль по числу публикаций принадлежит США (см. табл.4). Украинским ученым принадлежат 1% публикаций, что можно считать вполне удовлетворительным, учитывая объемы финансирования науки в Украине. Следует, однако, и здесь обратить внимание на позицию Польши, которая имеет в два раза больше публикаций в этой области. И это при том, что порошковая металлургия всегда была одним из приоритетов в материаловедении Украины.

Таблица 3

Основные методы получения консолидированных (компактных) материалов[5]

Группа	Основные разновидности	Объекты
Порошковая технология	Метод Глейтера (газовое осаждение и компактирование) Электроразрядное спекание Горячая обработка давлением Высокие статические и динамические давления при обычных и высоких температурах	Металлы, сплавы, химические соединения
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование Деформация кручением Обработка давлением многослойных композитов Фазовый наклеп Сдвиг под давлением	Металлы, сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Обычные и высокие давления	Аморфные вещества
Пленочная технология	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) Физическое осаждение из газовой фазы (PVD) Электроосаждение Золь-гель технология	Элементы, сплавы, химические соединения
Механическое сплавление	Высокоэнергетичный помол порошков	Металлы, сплавы

Таблица 4

Публикации по различным методам получения наноструктурных материалов (общее количество и распределение по некоторым странам) в БД MSCI (1991-2002 гг.)

Метод получения	Общее число публикаций	Число обзоров	США	Япония	Германия	Россия	Польша	Украина
Порошковая технология	246	3	22,4% (1)	6,1% (5)	17,5% (2)	8,9% (4)	2,9% (7)	1,6% (14)
Пленочная технология	17008	431	26,5% (1)	13,3% (2)	12,5% (3)	3,9% (6)	1,2% (15)	0,8% (21)

Кристаллизация	2305	26	15,6% (2)	17,1% (1)	14,8% (3)	4,5% (7)	4,8% (6)	0,5% (24)
Механическое сплавление	1268	17	14,8% (1)	14,0% (2)	10,6% (3)	8,0% (4)	6,4% (6)	0,1% (35)
Интенсивная пластическая деформация	242	5	22,7% (2)	5,8% (4-5)	5,8% (4-5)	47,5% (1)	1,7% (7)	0,4% (12)

Пленочная технология. Пленочная технология получения наноматериалов является самой распространенной, по-видимому, вследствие относительной простоты реализации наноструктурного состояния в процессах напыления, а также ввиду большой развитости различных методов нанесения покрытий. Доминирующее положение США здесь очевидно (табл.4)

Кристаллизационная технология получения наноструктурных материалов непосредственно быстрой закалкой из жидкого состояния или контролируемой кристаллизацией аморфных материалов является также одним из наиболее распространенных методов. Особенно важное значение этот метод имеет для получения магнитных материалов, как магнитомягких (типа «Finemet»), так и магнито жестких (главным образом, на основе соединения $Nd_2Fe_{14}B$) [10,11]. В этой области по числу публикаций Япония опережает США. Отметим также, что количество польских публикаций несколько превышает число российских работ (см. табл.4).

Механическое сплавление является достаточно простым методом, позволяющим реализовать наноструктурное состояние в широком круге материалов. Ведущими странами по использованию этого метода являются США, Япония, Германия и Россия.

Метод интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет создавать в объемных материалах сверхмелкое зерно (в ряде металлов, например в меди, размер зерен достигает 10 нм и менее). Особенно эффективно измельчение (фрагментация) зерен происходит при больших сдвиговых пластиче-

ских деформациях. Методы осуществления таких деформаций (в частности, равноканальное угловое прессование - РУП) были впервые предложены в СССР [8,9]. В ДонФТИ развиваются такие методы ИПД как винтовое прессование и пакетная гидроэкструзия [12,13]. Отметим, что украинские ученые внесли существенный вклад в становление метода получения наноструктур интенсивной пластической деформацией. Так в работах киевских исследователей методом просвечивающей электронной микроскопии подробно изучен был впервые генезис дефектной структуры металлов при больших степенях деформации, приводящий в итоге к формированию мелкозернистой структуры [10,11]. В ННЦ ХФТИ развит метод цикловых операций «осадка-выдавливание», позволивший получить мелкозернистый бериллий, обладающий сверхпластичностью [15-17]. Разработаны также методы глубокой деформации при криогенных температурах и показано, что снижение температуры деформации до азотных и гелиевых температур приводит к существенному усилению процессов фрагментации в однофазных и многофазных материалах [14-17]. Теоретические представления о механизмах фрагментации зерен и деформации наноструктурных материалов развиты в работах Санкт-Петербургской школы исследователей [18,19]. Активные работы по использованию метода ИПД ведутся в Уфе и Томске. Неудивительно поэтому, что основное число работ по получению наноматериалов методом ИПД опубликовано российскими исследователями (см. табл. 4).

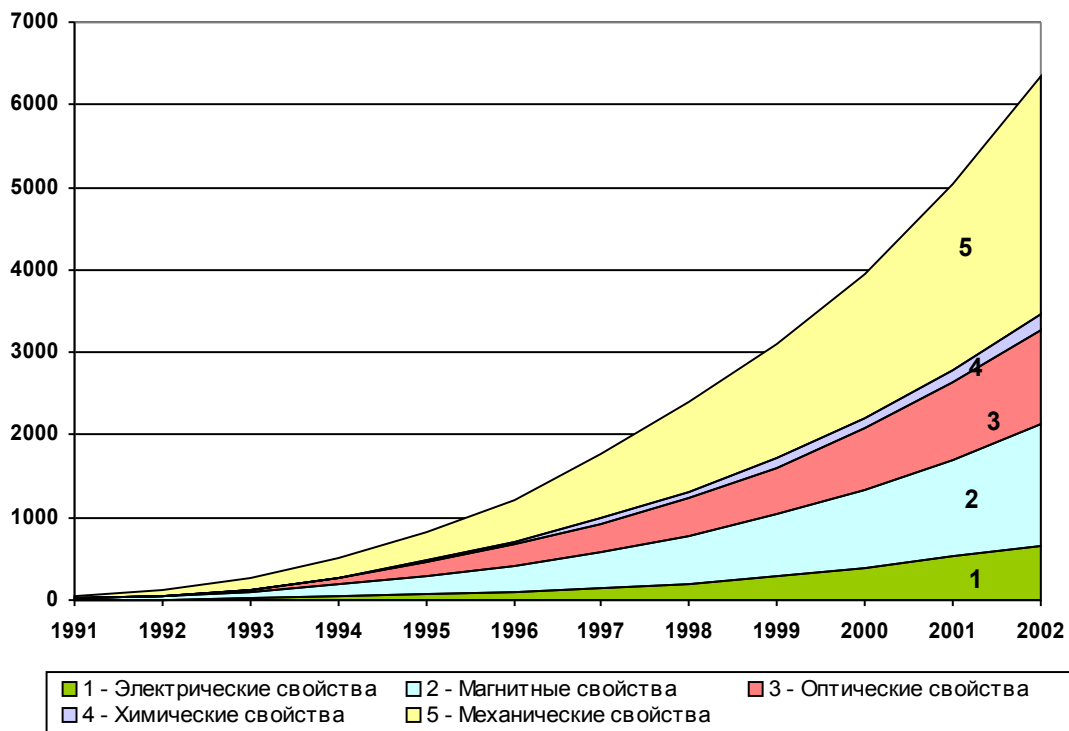


Рис. 2. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991-2002 гг.) по различным свойствам наноматериалов

Таблица 5

Публикации по различным свойствам наноструктурных материалов в БД MSCI (1991-2002 гг.)

Свойства	Число публикаций	Число обзоров	США	Япония	Германия	Россия	Польша	Украина
Механические	2795	54	33,7% (1)	15,0% (2)	9,7% (3)	4,2% (6)	< 1% (19)	< 1% (22)
Магнитные	1434	19	18,6% (1)	14,9% (2)	8,1% (3)	3,8% (9)	4,9% (6)	< 1% (32)
Оптические (опто-электронные)	1102	28	23,6% (1)	17,1% (2)	10,0% (4)	6,6% (5)	2,0% (9)	1,1% (16)
Электрические (электронные)	608	36	30,6% (1)	11,6% (2)	10,0% (3)	5,1% (5)	< 1% (22)	1,8% (13)
Химические (каталитические)	183	9	24,8% (2)	8,6% (3)	28,1% (1)	6,7% (4)	< 1% (20)	- (-)

Таблица 6

Твердость некоторых материалов, полученных методами компактирования и технологии пленок [3]

Состав	Метод изготовления	Относительная плотность	Толщина пленки, мкм	Размер зерна, нм	Твердость Н _v , ГПа
Компакты					
Fe	Теплое прессование	0,94	---	15	8
Fe-63%TiN	Динамическое прессование	0,92	---	12	13,5
Ni-54%TiN	То же	0,97	---	10	13
Ag-76%MgO	Прессование	---	---	2-50	2,5
Nb ₃ Al	Электроразрядное горячее прессование	0,97	---	30	18-22
TiAl	Горячее изостатическое прессование	0,99	---	20	6

WC-10%Co	Жидкофазное спекание	~1,0	---	~200	23,6
TiN	Высокие давления и температуры	0,98-0,99	---	30-50	29-31
TiN-50%TiB ₂	То же	0,98-0,99	---	---	34
Si ₃ N ₄	- « -	0,99	---	---	38
SiC	Горячее изостатическое прессование	0,97	---	70	27
BN	Спекание в ударных волнах	0,96	---	25	43-80
Алмаз	Динамическое прессование	0,91	---	---	63-68
Пленки					
TiN	Магнетронное напыление	---	1-2	5-30	35-50
TiB ₂	То же	---	1-4	2-8	50-70
Ti(B, N, C) _x	- « -	---	5-12	1-5	60-70
TiN-Si ₃ N ₄ TiSi ₂	Плазма CVD	---	3,5	3	~100
TiN/VN	Магнетронное напыление	---	2,5	2,5	54
TiN/NbN	Дуговое напыление	---	2	10	78
TiN/ZrN	То же	---	2	10	70

СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наибольшее число работ посвящено исследованию **механических свойств** наноматериалов (рис.2, табл.5). И это понятно, так как первоначально интерес к наноструктурным материалам был связан именно с их необычными механическими свойствами (табл.6). Как видно из рис.2, интерес этот все время возрастает. При этом наибольшее внимание изучению механических свойств наноструктурных материалов уделяется в США (исследователи этой страны опубликовали треть всех информационных документов по этим свойствам). Особенно привлекает исследователей и разработчиков возможность получения в наноструктурных материалах сочетания высоких прочностных и пластических свойств.

Традиционные методы упрочнения приводят обычно к снижению пластичности материала: чем выше прочность, тем ниже пластичность. Эта закономерность иллюстрируется рис.3. В то же время вследствие специфических механизмов деформации [18,19], материалы с нанокристаллической структурой, полученные, в частности равноканальным угловым прессованием и последующей термообработкой [8,9,20], обладают одновременно высокими прочностью и пластичностью (см. рис.3). Так например, в работе [21] глубокой деформацией при азотной температуре и последующим кратковременным отжигом получена медь с бимодальным распределением размеров зерен, имеющая предел текучести 350 МПа и равномерное удлинение до разрушения около 30%. Значительный интерес представляет высокопрочный наноструктурный титан, в частности для использования в качестве имплантантов в медицине.

Изучению **магнитных свойств** наноструктурных материалов также уделяется большое внимание. В значительной степени это связано с тем, что наноструктурные магнитомягкие материалы типа "Finemet" и магнитожесткие сплавы на основе со-

единения Nd₂Fe₁₄B уже сейчас находят широкое применение в технике [22]. Отметим, что Япония по числу публикаций в этой области лишь незначительно уступает США (см. табл.5).

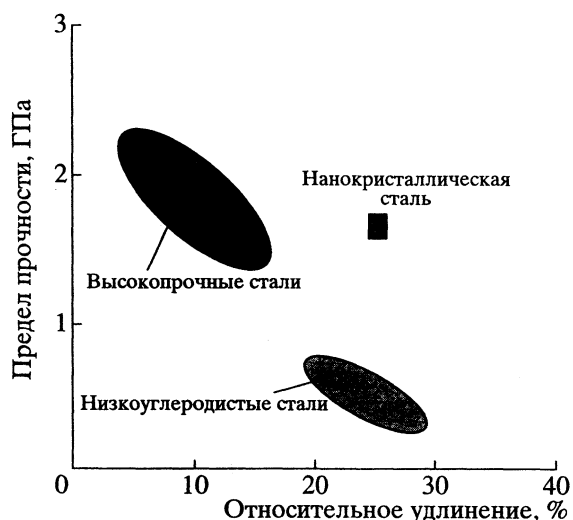


Рис.3. Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей [20]

Далее в порядке убывания числа публикаций следуют исследования **оптических, электрических и химических** свойств. Причем в последней области наибольшее число публикаций принадлежит ученым Германии, в которой исследования в области химии всегда были на высоком уровне в то время, как в двух первых из указанных областей первое место занимает США.

Проведенный анализ показывает, что исследования в области наноматериалов развиваются очень быстрыми темпами. Существует ряд национальных и международных программ, активно поддерживающих эти работы. Ведущими странами в области разработки методов получения наноматериалов и изу-

чения их свойств являются США, Япония, Германия, Франция, Россия. Активно ведутся исследования по наноматериалам в Польше. К сожалению, Украина по ряду направлений (наноструктурные металлические и полимерные материалы, получение наноматериалов кристаллизацией и механическим сплавлением, изучение магнитных свойств материалов с наноструктурой) существенно отстает по количеству публикаций от Польши. Для того, чтобы занять достойное место в области разработки и изучения наноматериалов, которые могут существенно изменить мир в 21-м веке, от украинских ученых потребуются значительные усилия. Успех в решении этой задачи в большой степени зависит от государственной политики в области финансирования и поддержки перспективных научных исследований и высоких технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.Е.Drexler. Engines of creation (The coming era of nanotechnology). *Ancor Books*, 1986. (Русский перевод <http://mikeai.nm.ru/russian/eoc/eoc.html>).
2. К.Е.Drexler. *Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation*. Wiley Interscience, 1992.
3. *Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований* / Пер. с английского под ред. Р.А.Андреевского. М.: «Мир», 2002.
4. *Societal implication of nanoscience and nanotechnology* / Eds. M.C.Roco, W.S.Bainbridge. Kluwer Acad.Publ., 2001.
5. Р.А. Андреевский. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // *Рос. хим ж.*, 2002, т.46, №5, с.50-56
6. Н. Gleiter. Nanostructured Materials: basic concepts and microstructure. *Acta mater.* 2000, v. 48, p.1-29.
7. А.И. Гусев. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // *УФН*, 1998, т.168, №1, с.55-83.
8. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов и др. *Процессы пластического структурообразования металлов*. Минск: Навука і техника, 1994.
9. Р.З.Валиев, В.И.Александров. Наноструктурные материалы, получаемые интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000.
10. В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев: «Наукова думка», 1975. В.И.
11. Трефилов, Ю.В. Мильман, Р.К.Ивашенко и др. *Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена*. Киев: «Наукова думка», 1983.
12. Я.Е.Бельгейзимер, Д.Ф.Орлов, Д.В.Сынков и др. Винтовое прессование: технологические аспекты // *Физ. и техн. высоких давлений*, 2002, т.12, №4, с.40-47.
13. В.Н.Варюхин, А.Б.Дугадко, И.Н.Матросов и др. Закономерности упрочнения волокнистых наноматериалов, полученных пакетной гидроэкструзией // *Там же*. 2003, т.13, №1, с.96-105.
14. I.I. Papirova, G.F.Tikhinsky. *Modern investigation of the beryllium*. Garinizdat Kharkov, 1998.
15. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, В.К. Аксенов. Структура и прочностные характеристики металлов с предельно искаженной кристаллической решеткой // *Металлофизика*, 1980, т. 2., №2, с.49-67.
16. В.К. Аксенов, Н.Ф. Андриевская, О.И. Волчок и др. Микроструктура и физико-механические свойства естественного композита Cu-Nb после волочения при 77К // *Металлофизика*, 1991, т.13, №5, с. 24-28.
17. М.А.Тихоновский, В.С.Безродный, И.Б. Доля и др. Дефектность структуры и прочность сильнодеформированных микрокомпозитов // *Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов*. Л.: ЛФТИ, 1985, с.193-195.
18. В. В. Рыбин *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. М.: «Металлургия», 1986.
19. М.Ю. Гуткин, И.А. Овидько *Дефекты и механизмы деформации в наноструктурных и некристаллических материалах*. С.- Петербург: Янус, 2001.
20. Н.П. Лякишев Наноструктурные материалы – новое направление развития конструкционных материалов // *Вестник РАН*. 2003, т.73, №5, с.422-425.
21. 10. Y. Wang, M. Chen, F. Zhou, E. Ma. High tensile ductility in nanostructured metal // *Nature*, 2002, v. 419, p. 912-915.
22. В.Г. Шадров, Л.В.Немцович. Нанокристаллические магнитные материалы // *Физ. и хим. обработки мат.* 2002, №5, с.50-61.

НАНОМАТЕРІАЛИ: АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ НА ОСНОВІ ДАНИХ ПРО ІНФОРМАЦІЙНІ ПОТОКИ

М.А. Тихоновський, А.Г. Шепелєв, Л.В.Пантєєнко
Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут",
61108, м.Харків, Україна

Проведено комп'ютерний аналіз публікацій, представлених в автоматизованій Міжнародній матеріалознавчій базі "Materials Science Citation Index", по проблемі компактних (консолідованих) наноматеріалів. Розглянуто інформаційні потоки по різним типам наноматеріалів, методам їх отримання і досліджуваним властивостям. Визначено вклад основних країн в загальну кількість публікацій по цим напрямкам. Представлена інформація про національні та міжнародні програми в галузі наноматеріалів і нанотехнологій.

NANOMATERIALS: ANALYSIS OF TRENDS OF DEVELOPMENT, BASED ON INFORMATION FLOW DATA

M.A. Tikhonovsky, A.G. Shepelev, L.V. Panteyenko
National science center "Kharkov Institute of Physics & Technology"
61108, Kharkov, Ukraine

Computer analysis has been performed using the publications presented in the automatic International materials science DataBase "Materials Science Citation Index" on compact (consolidated) nanomaterials. Consideration was given to the information flows on different types of nanomaterials, methods of their production and the properties studied. Contributions of major countries to the total number of publications on the topics under consideration were determined. Information is presented on certain national and international programs in the field of nanomaterials and nanotechnologies.