

Инновационное материаловедение

Рассмотрены потенциальные возможности нанотехнологии для многократного повышения технических характеристик машиностроительных материалов.

Ключевые слова: безразборный ремонт, холодная молекулярная сварка, нанопорошки, моностадийная нанотехнология, фрагментирование, объемные наноматериалы.



Г. М. Волков,
д. т. н., профессор,
зав. кафедрой
материаловедения
МГТУ «МАМИ»
e-mail: recom@list.ru

Введение

В настоящий момент в России сложилась такая промышленно-экономическая ситуация, при которой эксплуатируется внушительный парк изношенной техники самой различной номенклатуры. Большинство экспертов сходятся во мнении, что степень изношенности техники практически всех отраслей промышленности, изготовленной преимущественно еще во времена Советского Союза на отечественных предприятиях, составляет от 60 до 80% (по самым скромным оценкам).

В таких условиях не следует удивляться количеству случившихся в последнее время технических аварий, иногда с катастрофическими последствиями. С другой стороны, сильно изношенная техника все еще работает. Это еще раз подтверждает беспрецедентную живучесть производственных машин и технологического оборудования, изготовленных в свое время промышленностью СССР. Хрестоматийный пример высокого качества советских разработок в течение многих лет представляют всему миру выдающиеся технические характеристики и непревзойденные эксплуатационные показатели легендарного автомата М. Т. Калашникова.

Однако любая техника для поддержания своей работоспособности нуждается в техническом обслуживании, а также в профилактическом (не говоря о капитальном) ремонте. Большинство таких работ требует наличия специализированного оборудования и высококвалифицированного персонала для его обслуживания. Между тем, многие промышленные предприятия часто не в состоянии обеспечить соответствующее сочетание технической и кадровой составляющих для компетентного выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Кардинальным решением, с точки зрения материаловедения, является разработка конструкционных материалов нового поколения с техническими характеристиками, многократно превышающими достигнутый уровень, что позволит обеспечить создание конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Материалы для реновации изношенной техники

Одним из малозатратных методов ремонтно-восстановительных работ является безразборный ремонт узлов трения машин и оборудования [1].

Метод основан на введении в систему смазки узлов трения специальных добавок, которые восстанавливают изношенные поверхности. Это фиксируется по восстановлению технических характеристик узлов и агрегатов изношенной техники, в составе которых работают восстановленные узлы трения, в ряде случаев вплоть до номинальных значений. Полученные результаты соответствуют текущему, а в ряде случаев и капитальному, ремонту машины, хотя в данном случае отсутствует обязательные для этих видов ремонта разборка агрегатов машины и дефектация деталей: ремонт выполняется без разборки машин, оборудования или их агрегатов в режиме штатной эксплуатации.

Из традиционных способов реновации изношенных металлических деталей наиболее распространены термические сварка и наплавка. При этом прочность соединения в конечном счете определяется взаимодействием атомов наплавляемого и основного металлов. Атомарное взаимодействие может быть достигнуто только путем термического или силового воздействия на соединяемые объекты. Поэтому традиционные способы реновации вынуждены использовать громоздкое технологическое оборудование и обеспечивать его обслуживание высококвалифицированным персоналом.

Переход от атомарного взаимодействия к молекулярному позволяет исключить отмеченные недостатки традиционных способов реновации. Расходными материалами в данном процессе служат ремонтные композиционные материалы (сокращенно Реком), которые состоят из полимерной матрицы и дискретного наполнителя. Связь между поверхностями Реком – металл осуществляется за счет молекулярного взаимодействия полимерной матрицы композиционного материала с металлом восстанавливаемой поверхности. Изменение механизма упрочнения от атомарного взаимодействия (для металлов) к молекулярному (для Реком) позволяет отказаться от термического и механического воздействия на соединяемые поверхности. Вследствие отсутствия нагрева, обязательного для традиционных способов реновации, способ получил название холодная молекулярная сварка. В процессе затвердевания смеси компонентов Реком входящие в их состав молекулы соединяются в макромолекулярные цепи, которые переплетаются с дисперсными частицами дискретного наполнителя, образуя сложную трехмерную структуру, что обеспечивает надежность соединения Реком – металл.

Реновация выполняется на воздухе без нагрева и давления вне защитной среды без какого-либо оборудования, не требует высокой квалификации исполнителя. Основной рабочий инструмент — шпатель для формирования конфигурации сварного шва. Это позволяет выполнять ремонтные работы в производственных условиях промышленного предприятия, в том числе в пожаро- и взрывоопасных помещениях, а также, при необходимости, в полевых условиях. Работы обеспечены широкой номенклатурой Реком отечественного производства универсального, специального и аварийного назначения, в том числе для восстановления ржавых, мокрых и замасленных поверхностей [2]. Ремонт по технологии Реком гораздо дешевле традиционных способов ремонта. Затраты на закупку Реком и освоение технологии окупаются уже после первого ремонта. Анализ многолетнего сотрудничества с промышленностью показал, что работоспособность машиностроительной продукции, а также основного оборудования и инфраструктуры производственных предприятий любого профиля обеспечивается поставками трех марок расходных материалов холодной молекулярной сварки в следующих соотношениях Реком-Б — 80%, Реком-И — 10% и РА-У — 10%.

Материалы для создания конкурентоспособной техники

Для технического перевооружения отраслей массового машиностроения конкурентоспособными отечественными машинами необходимы материалы, уровень конструктивных свойств которых должен обеспечить технико-экономические преимущества вновь создаваемых машин перед зарубежными аналогами. Однако анализ экспериментальных работ по модификации наиболее широко применяемых в машиностроении металлических материалов показывает, что традиционные способы повышения их технических характеристик путем эмпирического подбора легирующих элементов и использования различных способов термомеханической обработки практически исчерпали себя. Аналогичные проблемы с повышением уровня свойств конструктивных материалов традиционными способами отмечены и в других областях материаловедения. Можно предположить, что в обозримом будущем от традиционных способов модифицирования конструктивных материалов трудно ожидать революционного изменения уровня потребительских свойств материалов, хотя эволюционное улучшение их технических характеристик неизбежно.

Принципиальный недостаток традиционных способов повышения физико-механических характеристик материалов заключается в обратно пропорциональной зависимости соотношения прочность — пластичность (рис. 1). Возможный успех технологических проектов по многократному повышению прочности материала блокируется столь же резким снижением его пластичности. Для преодоления данного противоречия следует обратиться к достижениям фундаментальных наук.

Уменьшение дефектности дискретных элементов структуры материала приводит к повышению его прочности. Экспериментально установлено, что содержание

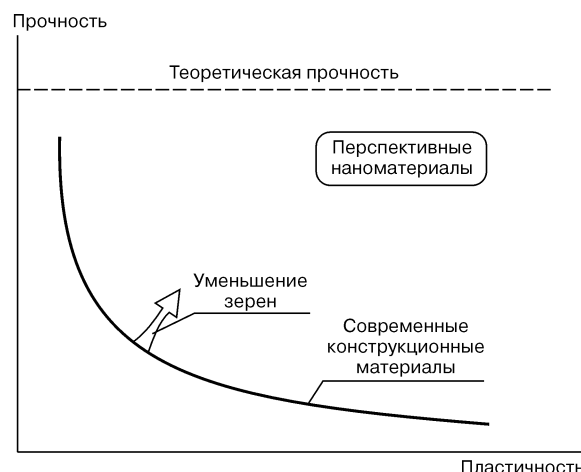


Рис. 1. Соотношение прочность — пластичность современных металлических материалов конструкционного назначения и объемных наноматериалов с металлической матрицей

дефектов в твердом теле обратно пропорционально степени его измельчения. Поэтому в материаловедении стремятся получить минимальный размер дискретных элементов структуры, которые обычно ассоциируются с зернами, из которых состоит материал. Коллоидная химия впервые обратила внимание на изменение свойств вещества в зависимости от степени его дисперсности (этим термином обозначают обратную величину размера частицы в сантиметрах) и показала, что системы со степенью дисперсности 10^5 – 10^7 , обладают особыми свойствами. Это не было раньше замечено ни физиками, ни химиками.

Позднее частицы такого размера стали называть наночастицами. Такое использование известной приставки «нано», применявшейся ранее лишь для обозначения кратных и дольных единиц измерения, для идентификации технологических процессов и продуктов: нанотехнология, наноматериалы и др. введено в научный и инженерно-технический обиход японским ученым Танигучи в 1974 г. К наноразмерным относят объекты с размерами менее 100 нм (1 нм = 10^{-9} м). Чтобы представить реальный размер объектов, которыми оперирует нанотехнология, можно привести такие аналогии. Если диаметр земного шара принять за 1 м, то 1 нм будет соответствовать диаметру футбольного мяча. Обычная атмосферная пыль и табачный дым содержат дисперсные частицы размером до 100 нм, что укладывается в классификационные рамки наночастиц.

Свойства любого вещества в нанометровом диапазоне размеров многократно отличаются от свойств макрообразца того же самого вещества, поскольку свойства макрообразца вещества формируются в соответствии с законами классической физики, а в свойствах наноразмерной частицы проявляются эффекты квантовой механики.

Технический потенциал наноразмерных объектов основан на различии энергетического состояния атомов вещества в объеме и на поверхности раздела фаз. Силовое поле атомов, расположенных на границе раздела фаз, резко отличается от энергетического состояния атомов, находящихся в объеме фазы (рис. 2).

Внутренние атомы испытывают равномерное воздействие окружающих атомов. В данном случае

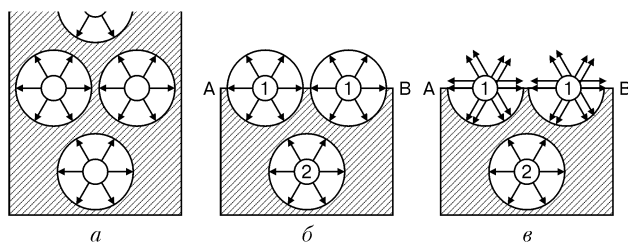


Рис. 2. Схема формирования поверхностного слоя в процессе диспергирования вещества: а — фрагмент исходного материального тела, б — возникновение свободной валентности атомов (1), выходящих на поверхность раздела А-В, в — переориентация свободной валентности поверхностных атомов (1) на взаимодействие с соседними атомами в объеме тела (2) (материальное тело выделено штриховкой, валентности обозначено стрелочками)

равнодействующая сил атомарного взаимодействия практически равна нулю.

Совершенно иным является силовое поле атомов, расположенных на поверхности раздела фаз. У атомов 1, которые очутились на вновь возникшей поверхности (А-В) материального тела, высвобождаются валентности, которые у атомов 2 в объеме тела были реализованы на взаимодействие с соседними атомами (на рис. 2 материальное тело выделено штриховкой, валентности условно обозначены стрелочками). Свободные валентности, направленные на момент появления вновь возникшей поверхности в сторону другой фазы, как показано на рис. 2, б, в следующий момент времени переориентируются на взаимодействие с внутренними и соседними периферийными атомами (усиление взаимодействия периферийных атомов на схеме условно обозначено двойными стрелочками (рис. 2, в). В таком состоянии будут находиться все атомы на поверхности раздела фаз, образуя поверхностный слой, свойства которого будут резко отличаться от свойств самой фазы. Это явление многократно подтверждено экспериментально на многих веществах. Необычные свойства поверхностного слоя формируются под действием равнодействующей свободных валентностей всех атомов, находящихся на поверхности раздела фаз.

Если вещество находится в жидком состоянии, то свободные валентности атомов на его поверхности реализуются в поверхностном натяжении. Равнодействующая сил, втягивающих атомы поверхностного

слоя внутрь жидкости, отнесенная к 1 см^2 поверхности и направленная перпендикулярно поверхности раздела, достигает значительных величин, например для воды она составляет около 11000 атмосфер. Воздействие таких огромных сил на поверхностные слои вещества объясняет повседневно наблюдаемые необычные свойства водной поверхности, например, наличие поверхностного натяжения нам наглядно демонстрируют свободно скользящие по поверхности воды жуки-водомерки.

В случае твердого тела аналогичное воздействие свободной валентности атомов, находящихся на его поверхности раздела с другой фазой, приводит к формированию избыточной поверхностной энергии. Однако наличие поверхностной энергии твердых тел менее заметно, не имеет наглядного подтверждения и в обыденной жизни практически не учитывается. Хотя силы атомарного взаимодействия в твердом теле значительно выше, о чем можно судить по соотношению прочности жидкость — твердое тело: жидкость практически не имеет прочности, а прочностные показатели твердых тел достигают значительных величин.

Технические приложения выдающихся свойств наноразмерного состояния вещества в настоящее время сосредоточены преимущественно в области электроники, а также в некоторых других областях науки и техники, где возможно практическое использование единичных наночастиц. Между тем, просматривается не менее эффективное использование преимуществ наноразмерного состояния вещества для многократного улучшения потребительских свойств традиционных материалов конструкционного и функционального назначения.

В настоящее время общепризнанно и экспериментально подтверждено, что достижение нанометрового интервала размеров дискретных элементов структуры материалов обеспечивает принципиально новый, существенно более высокий уровень их технических характеристик. Нанотехнология может решить проблемы рационального использования потенциальных возможностей широко применяемых в технике материалов и открывает новые, неизвестные ранее перспективы материаловедения.

Самые разнообразные вещества природного происхождения в газообразном, жидком или твердом состоянии служат исходным сырьем для традиционных технологий производства всех машиностроительных материалов (рис. 3). Дополнение традиционной техно-

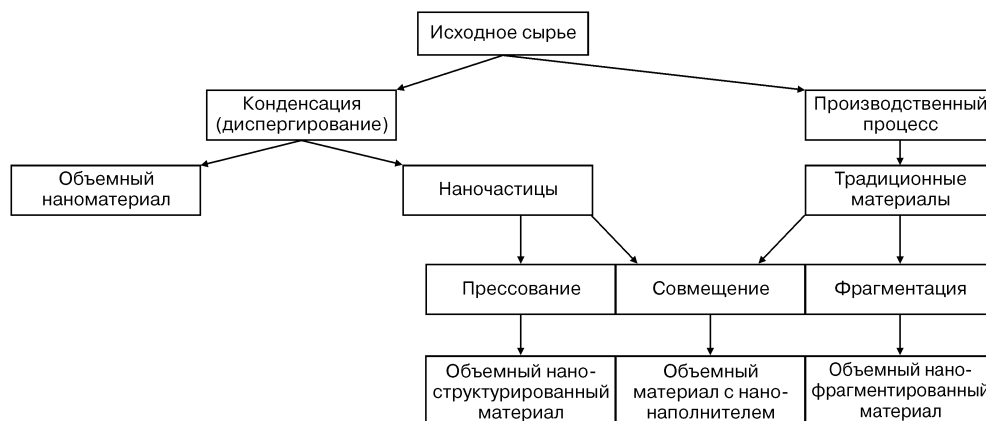


Рис. 3. Технологическая классификация объемных наноматериалов

логии потенциальными возможностями наноразмерного состояния вещества позволит многократно превысить достигнутый уровень их потребительских свойств.

Наиболее массовым продуктом нанотехнологии являются нанопорошки (рис. 3), производители которых предпочитают называть их наноматериалами. Однако они являются таковыми только по названию. На самом деле они состоят из дисперсных частиц размером до 100 нм, которые практически никак не связаны между собой. Использовать дисперсные частицы наноразмерного диапазона в качестве конструкционного материала машиностроительного назначения невозможно. Они могут служить только одним из сырьевых компонентов для последующего производства объемного материала, содержащего определенное количество наноразмерного наполнителя и пригодного для изготовления из него деталей машин, приборов и других технических устройств (рис. 3).

Исследованиями в области получения объемных материалов с наноразмерной добавкой занято наибольшее число участников. Повышенный интерес к данному направлению работ вызван тем, что наноразмерный наполнитель вводится в технически значимые материалы промышленного производства, не нарушая устоявшийся технологический процесс изготовления этих материалов. Дополнительным стимулом к дальнейшему развитию исследований по модифицированию промышленных материалов наночастицами является возможность получения максимального положительного эффекта при введении нанодобавок в сверхмалых количествах.

В нашей стране наноструктурированные материалы на основе ультрадисперсных, как они тогда назывались, нанопорошков были исторически первыми, специально разработанными для промышленного производства и успешно использованными еще в 50-е гг. XX в. при решении проблем «уранового проекта». На предприятиях бывшего Минсредмаша СССР было налажено производство, позволившее достичь большого экономического эффекта, разработчики которого были отмечены Ленинской премией [8].

В настоящее время объем платежеспособного спроса нанопорошков на мировом рынке составляет около 55 тыс. т/год. Наибольшим спросом пользуются нанопорошки тугоплавких оксидов, что находит объяснение в стабильности их свойств: они не требуют специальных мер для сохранения неравновесного наноразмерного состояния на месяцы или даже на годы хранения. Почти половину потребляемого количества нанопорошков составляет SiO_2 — 43,8%, остальные виды нанопорошков распределяются по химическому составу следующим образом: Al_2O_3 — 18,5%, TiO_2 — 6,2%, нанопорошки металлов составляют 14,9%, а все остальные виды — 16,6%.

В России производится более 200 типов нанопорошков, по химическому составу их ассортимент соответствует мировому распределению. Производством нанопорошков занято более 100 коллективов, преимущественно не промышленного, а научного типа (вузы, НИИ и др.). Поэтому объем реализации составляет только около 2 т/год, хотя потенциальный объем производства оценивается величиной около 10 тыс. т/год.

Очевидно, что освоение потенциального объема крупнотоннажного производства нанопорошков возможно только после создания на их основе востребованных промышленностью объемных наноматериалов машиностроительного назначения. Учитывая, что многократное улучшение потребительских свойств большинства материалов традиционной технологии достигается при введении в их состав менее 1% нанодобавок, можно ожидать увеличения производства нанопроductии с использованием нанопорошков до 1 млн т/год.

В качестве примера потенциального использования нанопорошков для производства нанопроductии можно отметить следующие перспективные направления.

Многокомпонентные металлосодержащие гибридные нанокompозиты используют для изготовления электродных материалов для гальванических батарей. Литий-ионные аккумуляторы с использованием нанокompозитных электродов легки и компактны, при равном весе они по емкости в 2 раза и по напряжению в 3 раза превосходят современные никель-кадмиевые аккумуляторы.

Нанокерамика на основе карбида вольфрама входит в состав композиционного твердого сплава инструментального назначения. Он значительно превосходит твердые сплавы аналогичного химического состава типа ВК8, но традиционной технологии, по прочности, ударной вязкости и износостойкости.

Для успешной реализации потенциальных возможностей наноразмерных частиц вещества в потребительских свойствах объемного материала необходимо решить следующие основные задачи:

- определить оптимальное значение верхнего предела наноразмерного диапазона дисперсных частиц вещества или структурных элементов материала;
- отработать технологию получения вещества в виде дисперсных частиц наноразмерного диапазона;

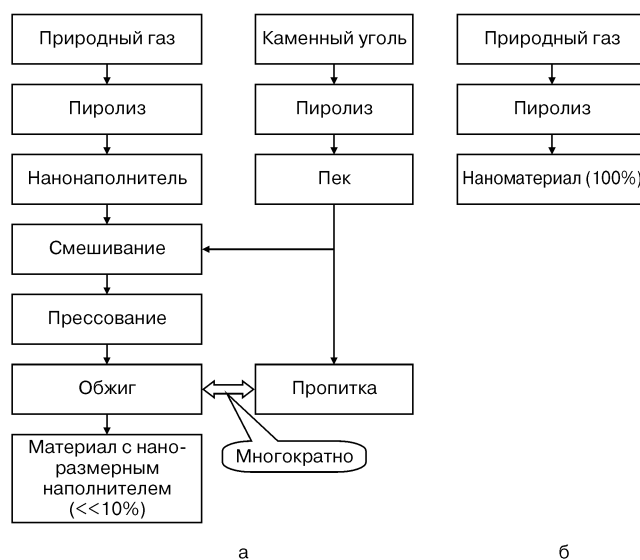


Рис. 4. Технология консолидации наночастиц в объемный материал: а — традиционная многостадийная технология объемного материала с наноразмерной добавкой, б — моностадийная технология объемного наноматериала

- отработать технологию консолидации наночастиц или фрагментирования структурных элементов материала до наноразмерного диапазона.

Теоретические расчеты и экспериментальные данные показывают, что многократное повышение уровня потребительских свойств машиностроительных материалов может быть достигнуто при размере дискретных элементов структуры материала менее определенного критического размера ($d_{кр.}$), который составляет около 10 нм [3].

Дискретные наночастицы, полученные из исходного сырья, независимо от их химического состава, геометрической формы и метода получения, для создания возможности практического использования преимуществ наноразмерного состояния вещества в реальных конструкциях вводят в матрицу. В качестве матрицы используют промышленные материалы традиционной технологии (рис. 3).

Для совмещения наполнителя с матрицей используют хорошо отработанную технологию композиционных материалов. Однако наноразмеры наполнителя создают значительные трудности в осуществление технологического процесса. Кроме того, технология включает в себя большое количество операций (рис. 4, а), что резко увеличивает продолжительность и стоимость технологического цикла производства конечного продукта.

Автором предложены теоретические основы моностадийной технологии объемных наноматериалов конструкционного назначения (рис. 4, б). Экспериментальная проверка теоретических положений выполнена на примере углерода в аллотропной модификации графита, что представляло значительный теоретический и практический интерес.

По предлагаемой технологии наноразмерный наполнитель формируется одновременно с матрицей в одном и том же химическом реакторе, т. е. технология является моностадийной: в реактор поступает сырье, а из реактора выходит конечный продукт — объемный наноматериал. Этим предлагаемая технология принципиально отличается от традиционной многостадийной технологии компактирования наноразмерного наполнителя. Предлагаемая технология позволяет практически при тех же экономических затратах получать объемный наноматериал вместо нанопорошка (рис. 3).

Структура и определяемые структурой свойства получаемого по предлагаемой технологии объемного наноматериала также выгодно отличаются от свойств объемного материала с наноразмерным наполнителем, получаемого по традиционной технологии композиционных материалов. По предлагаемой технологии объемная структура материала формируется путем связывания наночастиц в объемный монолит наноразмерными прослойками матрицы. Это означает, что все структурные элементы материала находятся в наноразмерном диапазоне, т. е. он является 100% объемным наноматериалом. Содержание наноразмерного наполнителя в объемном материале традиционной технологии по отмеченным выше технологическим причинам значительно меньше 10%. Соответственно и свойства получаемого по такой технологии материала с нано-

размерным наполнителем многократно ниже свойств предлагаемого 100% объемного наноматериала.

Углеродный наноматериал обладает уникальными свойствами, многократно превышающими достигнутый уровень свойств углеродных конструкционных материалов традиционной технологии: по прочностным показателям — в 3 раза, по коэффициенту трения — в 5 раз, по коэффициенту катодного распыления — в 15 раз, по окислительной стойкости — до 300 раз. Кроме того, он химически и биологически инертен, непроницаем для жидкости и газа, радиационностоек, а по высокотемпературной удельной прочности превосходит вольфрам. Промышленный технологический процесс отработан на пластинах, трубах и натуральных изделиях в производственных условиях. Уникальные свойства объемного наноматериала системы углерод — углерод, подкрепленные возможностью получения крупногабаритных заготовок деталей в промышленных масштабах, создали предпосылки для разработки и изготовления изделий современного машиностроения, не имеющих аналогов в мировой практике [4].

Теоретические основы моностадийной технологии объемных наноматериалов, реализованные на модельной системе углерод — углерод, представляют практический интерес для создания широкой гаммы принципиально нового класса объемных наноматериалов со свойствами выше мирового уровня из исходного сырья любого другого химического состава.

Другим направлением реализации преимуществ наноразмерного состояния вещества в свойствах объемного материала является фрагментирование структурных элементов будущего композиционного материала до наноразмерного состояния (рис. 3). Теоретической основой фрагментирования является вторичная кристаллизация материалов традиционной технологии, классификационным признаком которой является перестройка кристаллической решетки составляющих материал веществ в твердом состоянии без их плавления.

В случае твердофазной перекристаллизации реакционная среда служит матрицей, скрепляющей образующиеся наночастицы в наноразмерные фрагменты структурных элементов объемного наноматериала. Это означает, что при соответствующей организации технологического процесса получение объемного нанофрагментированного материала также может осуществляться в одну стадию. Процессы твердофазной перекристаллизации наиболее широко распространены в металловедении, на них основана технология термического упрочнения металлов и их сплавов [5].

В качестве матрицы в технологии нанофрагментированного материала используют промышленные материалы традиционной технологии (рис. 3), которые имеют и самостоятельное применение. Фрагментацию структурных элементов матрицы осуществляют различными способами, среди которых можно отметить:

- метод интенсивной пластической деформации металлов с основными модификациями аппаратурного оформления процесса:
 - кручение под квазигидростатическим давлением,

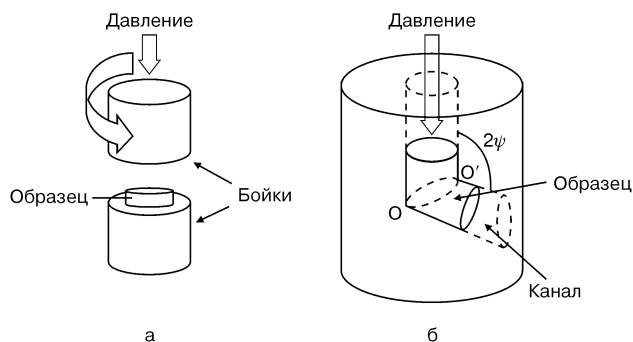


Рис. 5. Схема лабораторных установок для интенсивной пластической деформации металлов: а — кручение под высоким давлением, б — равноканальное угловое прессование

- равноканальное угловое прессование,
- всесторонняя изотермическаяковка;
- компактирование и спекание нанопорошков как металлов, так и неметаллов методами порошковой металлургии,
- вторичная кристаллизация аморфных металлов с выделением наноструктурированных кристаллитов интерметаллидов,
- модифицирование наночастицами расплава металла,
- вторичная кристаллизация стекла с выделением наноструктурированных кристаллитов химических соединений.

Перспективы промышленной реализации технологических принципов измельчения дискретных элементов структуры до наноразмерного диапазона рассмотрим на примере наиболее широко востребованного в инженерной практике машиностроительного материала — стали.

Необходимо отметить, что снижение вязкости и трещиностойкости стали в процессе ее упрочнения традиционными способами при эксплуатации деталей в сложных условиях часто приводит к авариям и экологическим катастрофам. Металлические материалы с дискретными элементами структуры наноразмерного диапазона могут обладать высокой пластичностью, сохраняя ее при повышении прочностных характеристик материала.

Сравнение величины соотношения прочность — пластичность современных металлических материалов конструкционного назначения с разрабатываемыми и перспективными нанокристаллическими сплавами показывает явное преимущество последних (см. рис. 1). Этим нанокристаллические материалы принципиально отличаются от современных металлических материалов конструкционного назначения, получаемых по традиционной технологии.

Контролируемое формирование наноразмерных фрагментов структуры в объеме стали позволяет повысить ее трещиностойкость в несколько раз при одновременном значительном увеличении прочностных характеристик. Желаемое изменение свойств стали достигают или путем введения в ее состав наночастиц на стадии металлургического производства или путем фрагментирования структурных составляющих товарной стали до наноразмерных фрагментов при термомеханической обработке.

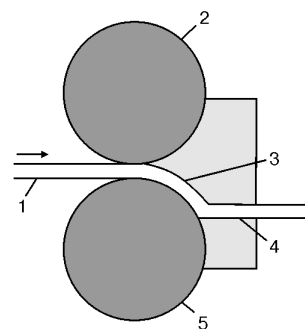


Рис. 6. Схема установки комбинированной прокатки и равноканального углового прессования для получения длинномерных прутков: 1 — образец, 2 — направляющий валок, 3 — зазор между валками, 4 — выходной канал, 5 — подающий валок

Одним из направлений практической реализации установленной фундаментальной наукой возможностей существенного повышения физико-механических характеристик конструкционных сталей является интенсивная пластическая деформация (ИПД). Фундаментальные исследования процессов ИПД и разработка на их основе наноструктурированных металлов и сплавов впервые были начаты коллективом российских ученых в конце 80-х гг. прошлого столетия под руководством чл.-корр. Башкирской академии наук Р. З. Валиева [6].

Перспективное научное направление быстро привлекло внимание сначала ученых других регионов России, а затем научно-технического сообщества многих зарубежных стран. Значительно возросло количество публикаций, становится традиционным проведение международных симпозиумов и научных конференций по этой тематике, в том числе в Уфе — родине нового научного направления.

Метод кручения под высоким давлением основан на обработке металла в установке (рис. 5, а), которую часто называют наковальней Бриджмена (по фамилии автора методики). Образец помещают внутрь полости установки и подвергают ИПД кручением под высоким давлением за счет вращения одного из бойков. Высокая степень сдвиговой деформации достигается при числе поворотов бойка $N \geq 5$, позволяя получать наноструктурированный металл с размером зерен 10-20 нм. Практическое значение метода ограничено размером образцов, которые обычно имеют форму диска диаметром до 20 мм и толщиной до 1 мм.

Метод равноканального углового прессования (рис. 5, б) основан на пластическом деформировании образца путем многократного продавливания его внешним давлением через угловой канал равного диаметра. В плоскости $O-O'$ происходит сдвиг со степенью деформации $\epsilon = 1,15$ при угле между каналами $2\psi = 90^\circ$. Повторными проходами образца через канал можно добиться накопления желаемой степени деформации и соответствующих структурных изменений металла.

Практическим результатом работ уфимских ученых по реализации потенциальных возможностей метода является получение длинномерных прутков диаметром до 12 мм. Работа выполнена на примере титановых сплавов, ИПД которых позволила фраг-

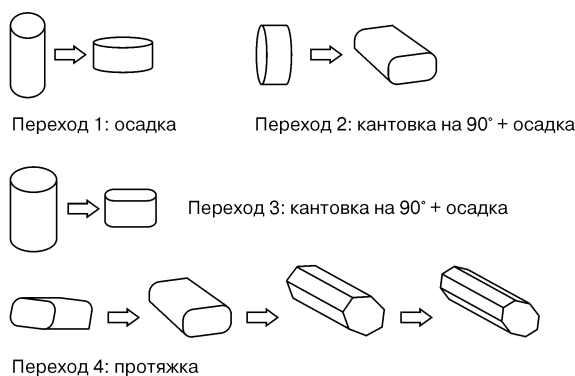


Рис. 7. Технологическая схема всесторонней изотермическойковки

ментировать исходные зерна до размера около 70 нм. Фрагментация привела к повышению предела выносливости сплавов в 2 раза и прочностных показателей в 2,5 раза. Рекомендуемая область применения новой продукции — высокопрочные крепежные изделия для машиностроения.

Основным препятствием для широкого применения метода ИПД в промышленности является необходимость многократного повторения циклов прессования исходного образца. Для устранения данного недостатка используются различные варианты аппаратного оформления технологического процесса ИПД. Один из аппаратных вариантов метода для производства длинномерных прутков путем непрерывного прессования исходного образца представлен на рис. 6.

Метод всесторонней изотермическойковки (другое название метода — «abc»-прессование), принципиальная технологическая схема которого представлена на рис. 7, позволяет реализовать метод ИПД в условиях промышленного производства крупногабаритных изделий на заводском оборудовании. Фундаментальные исследования процесса и технологические работы по их воплощению в промышленную технологию выполнены коллективом российских ученых под руководством академика РАН И. В. Горынина [7].

Метод основан на использовании сочетания процессов деформации и рекристаллизации для фрагментирования структуры в процессе поэтапной деформации заготовки в разных направлениях со снижением температуры каждого этапа последующей деформации. Это дает возможность измельчить зерна металла вплоть до наноразмерных величин, избегая разрушения заготовки. Число этапов и разность температур деформации между этапами зависят от типа металла и его исходной микроструктуры. Экспериментально установлено, что метод применим и к труднодеформируемым металлам и сплавам.

Наноструктурированные стали, полученные методом всесторонней изотермическойковки, уже используют для производства магистральных газо- и нефтетрубопроводов большого диаметра, предназначенных для эксплуатации в сложных природно-климатических условиях Крайнего Севера, в морской воде и в сейсмически активных горных районах Восточной Сибири.

Другое направление получения наноструктурированных металлов основано на термической обработке

аморфного сплава определенного состава, в результате чего в нем выделяются нанокристаллы, т. е. формируется нанокристаллический композиционный материал с матрицей из аморфного металла. Аморфная лента с нанокристаллическим наполнителем обладает высокими магнитными характеристиками, имеет низкую коэрцитивную силу и высокое электросопротивление. По техническим характеристикам нанокристаллические сплавы успешно заменяют все известные магнитно-мягкие материалы, превосходя в разы их лучшие рабочие характеристики.

Закключение

Реализация предлагаемого подхода к созданию конструкционных материалов для отраслей массового машиностроения требует определенных организационных мероприятий. В настоящее время большинство научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке объемных наноструктурированных материалов выполняется в интересах передовых отраслей машиностроения, где требования к материалам могут существенно отличаться от предъявляемых отраслями массового машиностроения.

Для объективной оценки новых материалов по критериям массового производства целесообразно организовать при одном из автозаводов научно-технический центр по промышленной доводке и внедрению наноструктурированных материалов в отрасли массового машиностроения. Отсутствие такой стадии подготовки инноваций к заводскому производству и потреблению конечного продукта может превратить результаты самоотверженного труда многих научных и производственных коллективов в невостребованное отечественной промышленностью интеллектуальное сырье для зарубежной переработки в конечный продукт.

Список использованных источников

1. В. И. Балабанов. Безразборное восстановление трущихся соединений. М.: МГАУ, 1999.
2. Г. М. Волков. Расходные материалы нового поколения для холодной молекулярной сварки // Конверсия в машиностроении, № 1, 1999.
3. Г. М. Волков. Технологические проблемы перехода от микро- к наносистемам консолидации дисперсных частиц вещества // Нано- и микросистемная техника, № 5, 2006.
4. Г. М. Волков. Конструкционные и функциональные свойства углеродного наноматериала индустриальной технологии // Сб. тезисов докладов научно-технологических секций Международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech 08». Т. 1. М., 2008.
5. Г. М. Волков, В. М. Зуев. Материаловедение: Учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2008.
6. Р. З. Валиев, И. В. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Изд-во ИКЦ «Академкнига», 2007.
7. И. В. Горынин. Создание конструкционных и функциональных наноматериалов // Инновации, № 6, 2008.
8. В. Ф. Петрунин. Ультрадисперсные порошки — российская ниша наноматериалов и перспективная база нанотехнологий // Экология — XXI век, № 7, 2005.

Innovative materials science

G. Volkov, doctor of engineering science, professor, head of dept. materials science.

Potential possibilities of nanotechnology for repeatedly increasing of technical characteristics of machine-building materials are considered.

Keywords: nondisassembly repair, cold molecular welding, nanopowders, monostage nanotechnology, fragmentation, bulk nanomaterials.