

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.91.01

А.С. Сивушкин, А.А. Кречетов

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОЛУЧЕНИЮ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ ОБЪЕМНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Одной из важнейших задач машиностроения является повышение механических свойств материалов и эксплуатационных свойств деталей машин: твердости, прочности, выносливости. Существует большое количество традиционных способов их повышения для металлических материалов. Одним общим недостатком для данных способов является заметное понижение пластичности при повышении прочностных характеристик. Применениеnano- и субмикрокристаллических (НК и СМК) материалов позволяет решить эту проблему. Наноструктурными материалами принято считать кристаллические материалы со средним размером зерен или других структурных единиц менее 100 нм, большеугловыми границами зерен и высокой плотностью дислокаций. Средний размер зерен СМК образцов может составлять порядка 100 нм – 1 мкм [1].

В настоящее время разрабатываются и обещают найти применение различные виды наноструктурных материалов: тонкая конструкционная керамика, высокопрочные сплавы, магнитные наноматериалы, материалы с особыми электрофизическими свойствами (сверхпроводники, резистивные, сенсоры), наноструктурированные покрытия, углеродные наноматериалы, нанокомпозиты, нанокатализаторы, жаропрочные сплавы, сплавы сверхбыстрого затвердевания, нанопленки и гетероструктуры, наночастицы и кластеры, объемные наноматериалы.

При этом улучшение соответствующих качественных показателей (прочность, твердость, пластичность, износостойкость, жаростойкость и т. д.) может быть достигнуто как посредством введения наноразмерных добавок (нанопорошков, нанотрубок, фуллеренов и др.) при осуществлении того или иного технологического процесса (литье, прессование, нанесение покрытий и др.), так и за счет соответствующих технологий изготовления объемных заготовок и изделий (равноугольное прессование, термомеханическая обработка и др.).

Технологии получения объемных наноматериалов являются одними из наиболее востребованных, имеющих реальное практическое применение и наиболее финансируемых направлений нанотехнологий. Область их применения доста-

точно широка: машино- и авиастроение, медицинские протезы и имплантаты, изделия для высокопрочного и надежного крепежа и др. Перспективность изучения объемных наноматериалов связана с их существенно более высокими характеристиками механических свойств по сравнению с традиционными [2, 3].

К настоящему времени разработано несколько способов получения объемных наноматериалов, основанных на двух основных принципах.

1) Снизу-вверх – предварительно дезинтегрированный на нанопорошки материал компактируется в объемный.

2) Сверху-вниз – когда наноструктурирование осуществляется без нарушения сплошности путем создания большеугловых границ зерен и накопления большой плотности дислокаций.

Способами, основанными на первом принципе, можно непосредственно получать объемные изделия из наноматериалов. Однако у данных способов есть свои недостатки: остаточная пористость получаемых при компактировании образцов (их плотность составляет 70–95 % от теоретической плотности соответствующего материала (до 95 % для нанометаллов и до 85 % для нанокерамики [4])), загрязнение образцов при подготовке порошков или их консолидации, геометрические размеры прессованных образцов.

Многие из перечисленных проблем решаются благодаря использованию способов, основанных на втором принципе, к которым относятся способы интенсивной пластической деформации (ИПД). Они обеспечивают измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмеров за счет больших деформаций сдвига. Наиболее изученными способами ИПД являются: равноканальное угловое прессование (РКУП), всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) и кручение под высоким давлением (КВД) (рис. 1) [2, 5]. Заготовки, получаемые данными способами, имеют высокие эксплуатационные характеристики (табл. 1).

Основными недостатками данных способов являются относительно малый размер и простая форма получаемых заготовок, тогда как изделия машиностроения, как правило, имеют сложную форму. Простая форма получаемых заготовок затрудняет промышленное внедрение способов

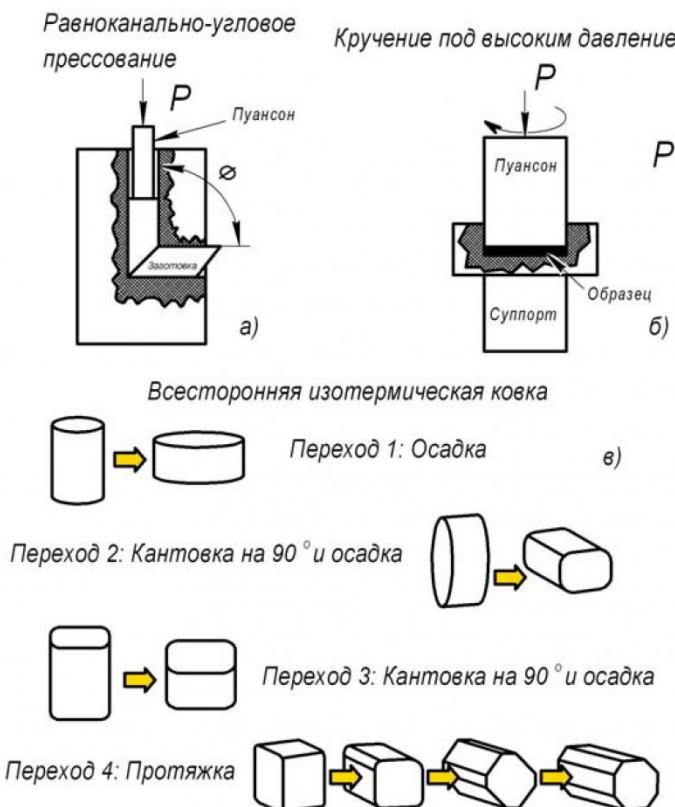


Рис. 1. Способы интенсивной пластической деформации

ИПД и вызывает необходимость дальнейшей механической обработки полученных образцов. Кроме того, существенным препятствием для широкого применения наноматериалов является их структурная нестабильность. Температура рекристаллизации в наноструктурированных металлах на 20–30% ниже, чем в обычных [9]. Таким образом, механическая обработка наноматериалов, в частности резанием, приводит к росту зерен и частичной потере полученных при наноструктурировании свойств. Это вызвано влиянием температурного и силового факторов, действующих при механической обработке.

Частично эту проблему можно решить с помощью электроэррозионной обработки, которая практически не меняет свойств обрабатываемых наноматериалов [10]. Однако далеко не все виды деталей можно получить таким видом обработки

(например, тела вращения). Также электроэррозионная обработка приводит к насыщению поверхности углеродом. Следовательно, изучение влияния режимов именно механической обработки на структурное состояние объемных наноматериалов является актуальным.

Свойства наноматериалов во время механической обработки, как уже говорилось, меняются под воздействием температурного и силового факторов. Рассмотрим влияние этих факторов отдельно, а также влияние непосредственно механической обработки.

Влияние термической обработки

Влиянию режимов термической обработки на структуру и свойства объемных наноматериалов посвящено большое количество работ. Исследования проводились на чистых металлах, сплавах, твердых растворах и интерметаллидах. Для всех

Таблица 1. Сравнение свойств крупнозернистых материалов и наноматериалов, Полученных способами ИПД

Материал	Исходное состояние	Наноструктурированное состояние
Титан	σ_b 700 МПа	σ_b до 1310 МПа [6]
Титан	Δ 26 %	Δ 12 % [6]
Титан	Микротвердость HV 1800	Микротвердость HV 2900 [3]
Сталь 20	σ_b 534 МПа	σ_b 812 МПа [7]
Сталь 20	Δ 26 %	Δ 14 % [7]
Алюминий	Микротвердость HV 280	Микротвердость HV 420 [8]
Медь	Микротвердость HV 750	Микротвердость HV 1500 [8]

этих видов наноматериалов можно выделить общие этапы эволюции структуры в процессе нагрева.

1. Перераспределение и уменьшение числа дислокаций, существующих в зернах материала, подвергнутого ИПД.

2. Перераспределение дислокаций в неравновесных границах зерен, образовавшихся при интенсивной деформации, что приводит к формированию большеугловых границ зерен, имеющих узкую толщину, соизмеримую с размерами атомов (создание более равновесной структуры).

3. Одновременное уменьшение дальнодействующих полей напряжений и упругих искажений кристаллической решетки в результате структурного возврата неравновесных границ зерен.

4. Укрупнение зерен при нагреве [1].

Температуры, при которых происходят те или иные процессы эволюции структуры, зависят от нескольких факторов и прежде всего от:

- природы исследуемого материала и его химического состава (основных элементов и особенно легирующих добавок и включений, которые могут значительно задержать эволюцию);

- метода и параметров интенсивной деформации (РКУ прессование, кручение или комбинация процессов), влияющих на структуру, формирующуюся сразу после деформации, и через нее на последовательность процессов, протекающих при последующем отжиге [1].

Все это хорошо подтверждается в работе [11], где исследуется термическое поведение сталей. Более пристальное внимание к термической обработке сталей связано с тем, что исследование эволюции ихnanoструктур требует дальнейшего изучения.

Авторы [11] исследовали влияние высокотемпературных отжигов на феррито-перлитную сталь, полученную РКУП по маршруту В_c (4 прохода при T = 200° С), 10Г2ФТ. Средний размер зерен после обработки составил 260 ± 90 нм. Также исследовали влияние термической обработки на СМК армко-Fe. Существенные изменения в армко-Fe начинаются уже при температуре 350° С. Анализ структуры 10Г2ФТ показали, что отжиг при 500° С не приводит к заметным изменениям размера зерен (средний размер зерен составил 370 нм). Отжиг в интервале температур 600-700° С приводит к заметным изменениям структурного состояния (средний размер зерен увеличивается до 2,9 мкм). Также заметно изменяются фазовый состав и эксплуатационные характеристики. Результаты [11] хорошо соотносятся с данными, полученными ранее.

Влияние деформационной обработки

Исследования влияния деформационной обработки на изменение структурного состояния НК и СМК материалов практически отсутствуют.

В работе [12] исследование влияния холодной прокатки со степенью обжатия 83% nanoструкту-

рированной с использованием РКУП меди показало, что данный вид деформационной обработки приводит к увеличению размера зерен в направлении (200) с 37 до 104 нм и уменьшению величины микроискажений кристаллической решетки в этом направлении с 52x10⁻⁴ до 37x10⁻⁴. Одновременно происходит увеличение микротвердости nanoструктурной Си в процессе холодной прокатки со значения 1180 до 1250 МПа.

Авторы работы [13] исследовали влияние комбинированной термомеханической обработки поверхностных плазменно-напыленных слоев из nanostructured механоактивированных NiTi и NiAl порошков с ЭПФ (эффектом памяти формы). Сразу после плазменного напыления осуществлялось ППД слоя с ЭПФ TiNi и NiAl при температуре 973 К. После этой операции и ТО проводится ППД слоя с ЭПФ в интервале температур мартенситных превращений Ms–Mf. В результате обкатки происходит уменьшение размера зерен и более равномерное их распределение по глубине слоя. После ППД образуется однородная нанокристаллическая структура слоев NiTi и NiAl с размером зерна порядка 50–150 нм.

Небольшое количество работ, посвященных влиянию деформационной обработки на структурное состояние НК ИСМК материалов, не позволяет выделить общие этапы эволюции структуры различных материалов при разных способах обработки. Соответственно необходимо дальнейшие исследования в данном направлении.

Влияние резания

Имеющиеся работы, посвященные исследованию влияния режимов резания на структурное состояние объемных наноматериалов, не позволяют делать обобщенные выводы. В частности, есть ряд работ украинских ученых из Национального технического университета «ХПИ» и Кременчугского государственного университета имени Михаила Остроградского. Исследования проводились на титане и меди, изучалось точение и фрезерование. Результаты этих исследований [3, 14, 15] показывают, что механическая обработка точением и фрезерованием НК и СМК металлов, в частности титана ВТ1-0 и меди технической чистоты (Cu: 99,98%), полученных с помощью ВИК, приводит к снижению микротвердости обработанных образцов. При увеличении подачи и скорости резания эксплуатационные характеристики падают до уровня крупнокристаллических металлов. Помимо этого, в работах [3, 14] были установлены рациональные режимы механической обработки для титана и меди, при которых материал сохраняет свои высокие эксплуатационные характеристики. Также в работе [15] была разработана методика определения рациональных режимов лазерной обработки. Данная методика позволяет определить режимы лазерной обработки для различных чистых НК и СМК металлов, обеспечивающие сохранение в обрабатываемой заготовке

исходных физико-механических свойств. Алгоритм построен на физических характеристиках заготовки (исходный размер зерна и теплофизические характеристики), модели определения интенсивности роста зерна под действием температурных и временных факторов, характеризующих процесс резания металла заготовки. Недостатком методики является то, что она не учитывает влияние силового фактора при механической обработке, что требует дальнейшего развития.

Выводы: НК и СМК материалы позволяют успешно решать проблему повышения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения при сохранении удовлетворительной пластичности. Вместе с тем, существует ряд проблем, связанных с обработкой таких материалов в связи с их структурной нестабильностью.

Имеющиеся результаты в области исследования влияние режимов механической обработки на

структурное состояние НК и СМК материалов практически не описывают рассматриваемые процессы для традиционных углеродистых конструкционных сталей, тогда как именно эти стали имеют наибольшее распространение в машиностроении. Поэтому изучение эволюции структуры НК и СМК наноструктурированной углеродистой конструкционной стали в процессе механической обработки является актуальной задачей.

Конечной целью исследования является разработка методики проектирования технологических процессов механической обработки объемных НК и СМК материалов. Создание такой методики позволит повысить эффективность изготовления изделий сложной формы с наименьшими потерями свойств, полученных на стадии наноструктурирования, что позволит получать более конкурентоспособную продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. - М.: Логос, 2000. - 272 с.
2. Лякишев Н.П. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. Т. 1. № 1–2. 2006. С. 71-81.
3. Верезуб Н.В. Влияние механической обработки на микротврдость заготовок из титана с субмикрокристаллической структурой, полученных интенсивной пластической деформацией / Н.В. Верезуб, Л.И. Пупань, А.А. Симонова // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. прац. – Харьков, 2011. – С. 214-221.
4. Гусев А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. –Екатеринбург: УрО РАН, 1998.
5. Рааб Г.И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов / автореф. докт. диссерт. – Уфа, 2009. – 36 с.
6. Якушина Е.Б. Наноструктурный титан для биомедицинских применений / Е.Б. Якушина, И.П. Семенова, Р.З. Валиев // Цветные металлы. 2010. № 7. С. 81-83.
7. http://www.ocean.ru/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=374&Itemid=78
8. Horita Z. On Conditions for Grain Refinement Using Severe Plastic Deformation // Bulk nanostructured materials:from fundamentals to innovations. Book of abstracts. – Ufa. 2007. P. 26-27
9. Дегтярев М.В. О термической нестабильности микрокристаллической структуры в однофазных металлических материалах / М.В. Дегтярев, А.В. Воронова, В.В. Губернаторов, Г.И. Чащухина // ДАН. 2002. Т.386. №2. С. 180-183.
10. Нанотехнологии в Республике Башкортостан. <http://www.minpromrb.ru/upload/news/2011.08/nanotech.pdf>
11. Астафурова Е.Г. Влияние высокотемпературных отжигов на микроструктуру и механические свойства феррито-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию / Е.Г. Астафурова, С.В. Добаткин, Г.Г. Захарова, Е.В. Найденкин, Г.И. Рааб // Физика металлов и металловедение. 2011. Т.111. №1. С. 64-73.
12. Alexandrov I.V., Wang Y.D., Zhang K., Lu K., Valie v R. Z.—In: Proceedings of the Eleventh International Conference on Textures in Materials. – Beijing: Intern. Acad. Publ., 1996. V. 2. P. 929.
13. Бледнова Ж.М. Формирование наноструктурированных поверхностных слоев плазменным напылением механоактивированных порошков из сплавов с ЭПФ / Ж.М. Бледнова, П.О. Русинов // Российские нанотехнологии. Статьи. 2010. Т.5. №4. С. 77-83.
14. http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcipi/TvM/2010_54/st017.pdf
15. http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcipi/TvM/2010_53/st015.pdf

□Авторы статьи:

Сивушкин

Александр Сергеевич,
аспирант каф. «Технология машиностроения» КузГТУ
E-mail: asashai_1@mail.ru

Кречетов

Андрей Александрович,
канд. техн. наук, доцент каф. «Технология машиностроения» КузГТУ
E-mail: krcchetov@mmsflkuzstu.ru