

PACS: 81.40.-z

Г.И. Рааб

## К ВОПРОСУ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Институт физики перспективных материалов,  
Уфимский государственный авиационный технический университет  
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия  
E-mail: raab@mail.rb.ru

*Приведены результаты исследований и анализа наиболее перспективных схем равноканального углового прессования (РКУП) металлических материалов. Показаны перспектива и пути реализации эффективных промышленных процессов получения объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов с высоким уровнем технических и технологических свойств.*

### Введение

Интенсивное развитие научных исследований в области объемных УМЗ-материалов и получение на этой основе качественно новых свойств в широкой гамме наиболее распространенных цветных и черных металлов и сплавов [1,2] открывает большую перспективу их применения. В этой связи некоторые отрасли, например аэрокосмическая и медицина, проявляют значительный интерес к реальным объектам из УМЗ-материалов. В то же время известно, что прикладные поисковые работы требуют на порядок большего объема финансовых вложений, и поэтому фокус этих исследований должен быть сконцентрирован на наиболее перспективных процессах, отвечающих требованиям как массового, так и мелкосерийного производства УМЗ-материалов. Учитывая, что их получение предполагает, как правило, передел (например, сортового проката с размером зерен 10–100  $\mu\text{m}$ ), можно сделать заключение, что основным и определяющим фактором промышленного производства объемных УМЗ-материалов будет соответствие себестоимости передела и новых потребительских свойств изделий или полуфабрикатов. Наиболее важными из потребительских свойств металлических материалов следует считать номенклатуру материалов, выпускаемый сортамент, уровень и стабильность механических характеристик.

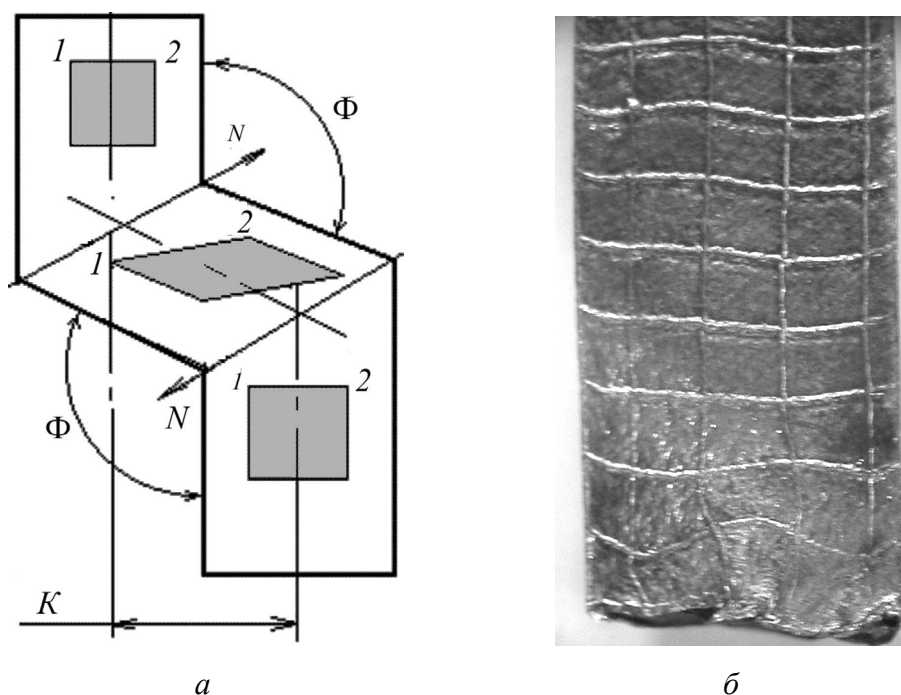
Большинство материалов в УМЗ-состоянии отличаются значительным (до 3 раз) повышением их прочностных характеристик при удовлетворительной

пластичности [1]. Анализируя с этой точки зрения потребности объемных УМЗ-материалов, можно выделить несколько направлений. Это в первую очередь длинномерные прутковые и листовые материалы, а также штучные (дискретные) заготовки. Представляет интерес получение объемных УМЗ-заготовок в виде дисков или передел слитков с крупнозернистой крайне неоднородной литой структурой. Учитывая широту проводимых исследований в данных направлениях и сложность учета всех факторов, представленная работа ограничивается анализом высокоэффективных процессов получения объемных прутковых УМЗ-материалов, как дискретных, так и длинномерных, способом РКУП. Следует отметить, что этот способ уже в течение 10 лет развивается и исследуется нами с целью формирования УМЗ-структур в металлах и сплавах [1–4].

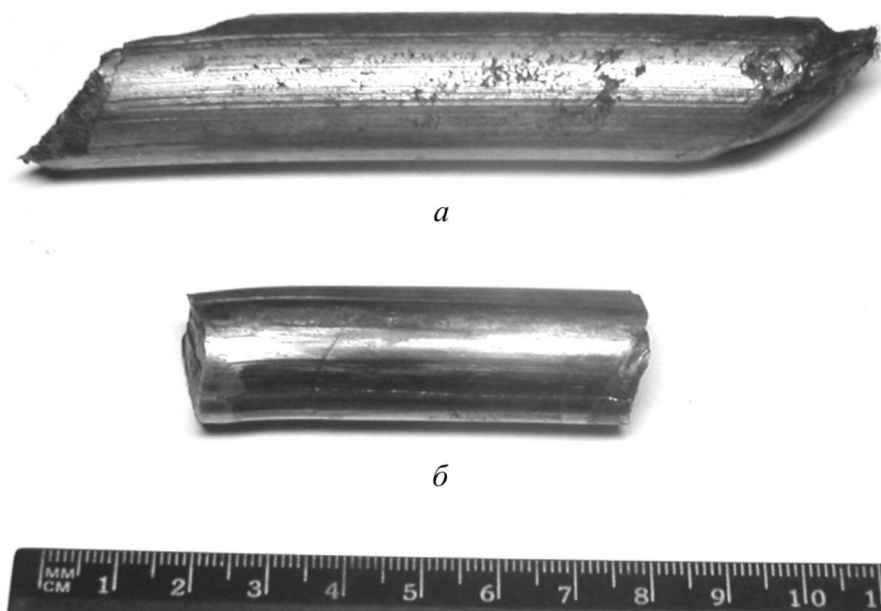
Какие же проблемы должны быть решены при производстве объемных УМЗ-материалов? В первую очередь процесс должен обеспечивать высокий коэффициент использования металла (КИМ). Известно, что при РКУП по общепринятой схеме во взаимно пересекающихся каналах преимущественно под углом  $90^\circ$  концевые участки заготовок искажаются и фактически подлежат удалению. При этом КИМ при получении штучных заготовок с отношением длины к диаметру 5–7, как правило, не превышает 0.6–0.7. Поэтому процессы получения длинномерных заготовок более предпочтительны, так как позволяют значительно снизить влияние законцовок на КИМ и довести его до значений, близких к единице. Другой важной задачей при получении УМЗ-материалов является создание высокопроизводительных технологий (например, близких по производительности к прокатке для длинномерных изделий или к высокоскоростной высадке для штучных заготовок). Для реализации этих задач необходимо выполнить большой объем мероприятий как организационного, так и научно-технического характера. Решению наиболее важных проблем при получении объемных УМЗ-материалов посвящена представленная работа.

#### **Научно-технические подходы к получению объемных УМЗ-материалов**

**Получение штучных УМЗ-заготовок.** Как было отмечено, при получении штучных УМЗ-заготовок важной является необходимость повышения КИМ, поскольку потери металла могут существенно снизить эффективность производства. Эту задачу для способа РКУП можно решить, если использовать схему деформирования, представленную на рис. 1,а [5]. Варьируя параметрами  $K$  и углом пересечения каналов  $\Phi$ , можно активно влиять на напряженно-деформированное состояние заготовок и соответственно эффективность формирования УМЗ-структуры. Но самое важное, что следует отметить, данная схема позволяет за один цикл воздействия провести два акта деформирования и значительно уменьшить искажение концевых частей заготовки (рис. 2). Это не только приводит к резкому повышению КИМ до значений 0.9 и снижению в два раза количества циклов прессования, но и



**Рис. 1.** Схема РКУП–ПК (где  $N$  – направление сдвига,  $K$  – параметр смещения каналов,  $\Phi$  – угол пересечения вертикальных и соединяющего их каналов) (*a*) и вид сетки с исходной прямоугольной формой ячеек после одного цикла прессования (*б*)



**Рис. 2.** Общий вид медных заготовок после РКУП: *a* – по общепринятой схеме с углом пересечения каналов  $90^\circ$ , *б* – в параллельных каналах с углом их пересечения  $100^\circ$

позволяет получать УМЗ-заготовки с малым отношением длины к диаметру. Следует учитывать, что силы деформирования РКУП в параллельных каналах (РКУП–ПК) значительно выше получаемых при прессовании по традиционной схеме с двумя пересекающимися каналами, и наиболее вероятное соотношение длины заготовок к их диаметру не будет более шести. Анализ деформированного состояния методом сеток позволяет судить о довольно высокой его однородности после одного цикла прессования (см. рис. 1,б), и даже заготовка с отношением длины к диаметру около двух после четырех циклов прессования имеет однородную УМЗ-структуру (рис. 3,б). Полученное однородное поле микротвердости в продольном и поперечном сечениях ( $HV = 1530 \pm 20$  МПа) также свидетельствует об однородности структуры и механических свойств в объеме заготовки. Прочность медной заготовки после проведенной обработки возросла со 150 до 420 МПа при пластичности  $\delta = 15\text{--}18\%$ , что сопоставимо со значениями, полученными после 8–12 циклов РКУП меди по общепринятой схеме с углом пересечения каналов  $90^\circ$ . В качестве положительного фактора также следует отметить, что после деформации РКУП–ПК заготовка сохраняет свое исходное вертикальное положение. Это весьма удобно при автоматизации процесса, например, на высокопроизводительных роторных линиях. Оценивая в комплексе преимущества представленной схемы, следует ожидать высокой эффективности процессов, которые на ней базируются.

**Получение длинномерных УМЗ-заготовок.** Наиболее реальная схема РКУП для получения длинномерных заготовок была предложена В.М. Сегалом [6]. В ее основе лежит «конформ»-процесс, который был развит в ряде его модификаций применительно к изготовлению алюминиевых лент [7]. Следует напомнить, что получение длинномерных заготовок в УМЗ-состоянии является более эффективным как при производстве, так и при последующей переработке. Во-первых, КИМ процесса можно довести до значений, близких к единице, поскольку доля дефектных концевых частей в длинномерной заготовке составляет доли одного процента. Во-вторых, РКУП-«конформ» легко встроить в существующие высокопроизводительные процессы, так как он позволяет обеспечить высокие скорости обработки, сопоставимые, например, с прокаткой. Длинномерные изделия наиболее

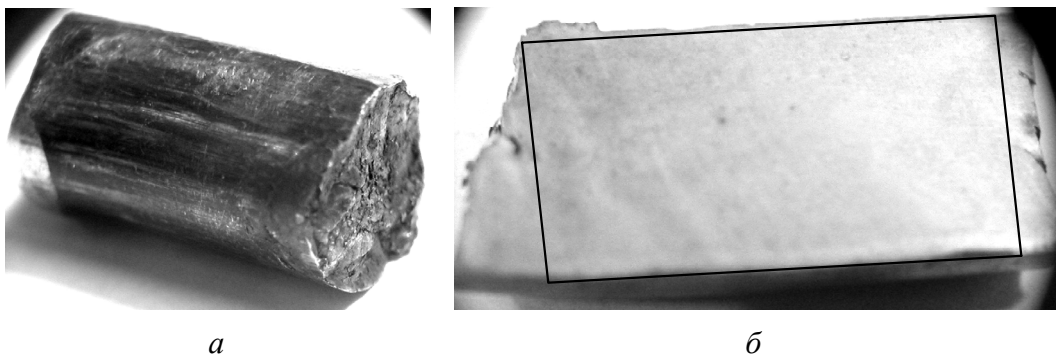


Рис. 3. Общий вид (а) и макроструктура (темплет) (б) заготовки после четырех циклов РКУП–ПК с соотношением длины к диаметру, равным 2

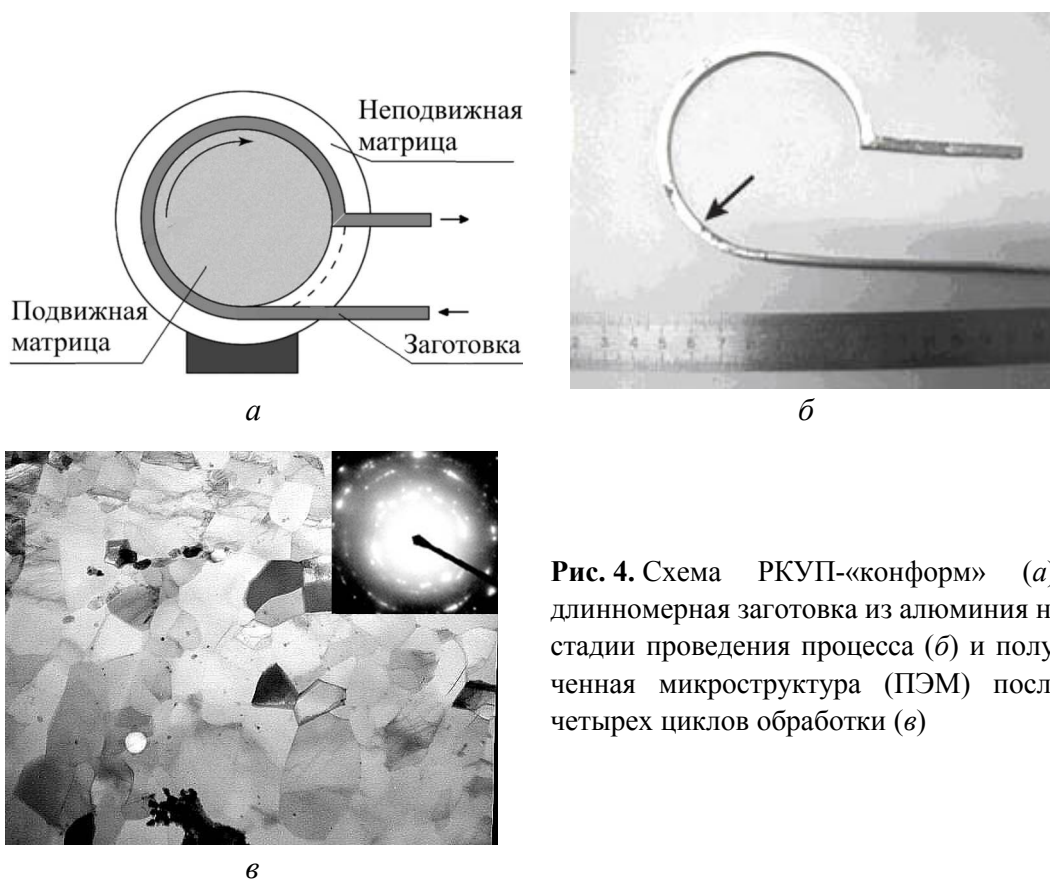


Рис. 4. Схема РКУП-«конформ» (а), длинномерная заготовка из алюминия на стадии проведения процесса (б) и полученная микроструктура (ПЭМ) после четырех циклов обработки (в)

технологичны и при последующем переделе как способами ОМД, так и лезвийной обработкой, например, на высадочных или токарных автоматах.

Исследования способа РКУП-«конформ» (рис. 4), проведенные нами на чистом алюминии при комнатной температуре, показывают высокую эффективность такого процесса [8,9]. После четырех циклов обработки в материале была сформирована достаточно однородная УМЗ-структура с размером зерен менее одного микрона (рис. 5) и получены высокопрочные образцы прямоугольного сечения  $2.4 \times 2.6$  mm длиной около 300 mm. Однако следует учитывать, что для реализации способа необходимо создание специального оборудования, более наукоемкого и дорогостоящего по сравнению с оснасткой для реализации процесса РКУП-ПК. К тому же способ позволяет получать длинномерные изделия только прямоугольного поперечного сечения, а для нужд производства требуется, как правило, круг как наиболее технологичный при последующей обработке. Передел в круг также потребует некоторых затрат.



Рис. 5. Рентгеноскопический снимок УМЗ-образца диаметром 11 mm из сплава ВТ1-0, полученного РКУП ( $e = 9$ ) и последующей экструзией ( $e = 1.2$ )

Суммируя полученные результаты и тенденции развития способа РКУП-«конформ», отметим, что он требует создания наукоемкого оборудования и соответственно наиболее эффективен для серийного, или массового, производства. Высокая рентабельность и окупаемость такого процесса наиболее вероятна в этих условиях.

**Технологичность УМЗ-материалов.** Большой интерес вызывает возможность последующей обработки полученных (в том числе и способом РКУП) УМЗ-материалов. С этой целью на примере титанового сплава ВТ1-0 в УМЗ-состоянии, полученного РКУП со степенью накопленной деформации  $e = 9$ , проведены исследования его деформируемости. При комнатной температуре по методике, представленной в [10], была построена диаграмма пластичности, которая легла в основу изучения деформируемости сплава методом экструзии. В результате исследований было показано, что УМЗ-материал в процессе деформирования продолжает упрочняться. При этом деформация со степенью 75% ( $e = 1.2$ ) приводит к повышению прочности с 750 до 1050 МПа с уровнем пластичности  $\delta = 10\%$  [11]. После такой обработки заготовки не имели внутренних дефектов, о чем свидетельствуют данные рентген-контроля (рис. 5). Аналогичные исследования проведены по экструзии УМЗ-титанового сплава ВТ6. Экструзия УМЗ-состояния при комнатной температуре со степенью около 60% ( $e = 0.8$ ) позволила повысить прочность с 1100 до 1490 МПа с уровнем пластичности  $\delta = 8\%$  [12]. Полученные результаты свидетельствуют о довольно высокой деформируемости УМЗ-материалов, и это обстоятельство, вероятно, в большинстве случаев позволит проводить передел исходных УМЗ-заготовок для получения требуемого сортамента со значительно повышенными механическими свойствами. К тому же, если при переделе УМЗ-материалов использовать высокопроизводительные процессы, такие как прокатка, волочение, высокоскоростная экструзия, то это не окажет существенного влияния на повышение себестоимости готовой продукции.

### Выводы

Проведенные исследования и анализ полученных результатов показывают, что представленные способы РКУП могут обеспечить качественно новые высокопрочные состояния серийных металлов и сплавов. При этом возможно создание высокоэффективных комплексных технологий получения объемных высокопрочных УМЗ-материалов необходимого сортамента и номенклатуры.

1. *Р.З. Валиев, И.В. Александров, Y.T. Zhu, T.C. Lowe, JMR 17, 5 (2002).*
2. *Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).*
3. *И.В. Александров, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, Л.О. Шестакова, Р.Дж. Даудинг, Вольфрам, тяжелые металлы и тугоплавкие сплавы № 5, 27 (2000).*

4. Г.И. Рааб, Е.П. Сошникова, Р.З. Валиев, Материалы конференции NANO SPD2, 9–13 дек., 2002, Вена, Австрия, с. 471–476.
5. Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, Г.В. Кулясов, В.А. Полозовский, Патент РФ № 2181314, Бюл. № 16 (2002).
6. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).
7. N. Tsuji, Y. Saito, S.-H. Lee, Y. Minamoto, Материалы конференции NANO SPD2, 9–13 дек., 2002, Вена, Австрия, с. 479–490.
8. Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, Цветная металлургия № 5, 50 (2000).
9. G.I. Raab, R.Z. Valiev, T.C. Lowe, Y.T. Zhu, Mater. Sci. Eng. A382, 30 (2004).
10. Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др., Теория пластических деформаций металлов, Е.П. Унксов, А.Г. Овчинников (ред.), Машиностроение, Москва (1983).
11. Г.И. Рааб, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов, Р.З. Валиев, КШП № 5, 20 (1999).
12. I.P. Semenova, Y.T. Zhu, G.I. Raab, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, Ultrafine Grained Materials III, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society) (2004), p. 463–468.

G.I. Raab

## ON THE PROBLEM OF INDUSTRIAL PRODUCTION OF BULK ULTRAFINE-GRAINED MATERIALS

Results of investigation and analysis of the most prospective scheme of the equal-channel angular pressing (ECAP) of metallic materials are given. Prospects and ways of implementation of effective industrial processes of producing the bulk ultrafine-grained (UFG) materials with a high level of technical and technological properties are shown.

**Fig. 1.** Scheme of the equal-channel angular pressing in parallel channels (PC–ECAP) (where  $N$  – direction of shear,  $K$  – parameter of channel shift,  $\Phi$  – angle of vertical and connecting channels intersection) (a) and the view of net with the initial rectangular shape of cells past one cycle of pressing (b)

**Fig. 2.** General view of copper billets past ECAP:  $a$  – by conventional scheme with a  $90^\circ$  angle of channels intersection,  $b$  – in parallel channels with the intersection angle of  $100^\circ$

**Fig. 3.** General view (a) and microstructure (template) (b) of billet past four PC–ECAP cycles, the length-to-diameter ratio makes 2

**Fig. 4.** Scheme ECAP-«conform» (a), long aluminium billet at the stage of process realization (b), and microstructure (TEM) resulted from four cycles of processing (c)

**Fig. 5.** X-ray radioscopy photograph of UFG specimen, 11 mm in diameter, from alloy BT1-0 produced by the ECAP ( $e = 9$ ) followed by extrusion ( $e = 1.2$ )