

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 μm), 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° 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 Φ , 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

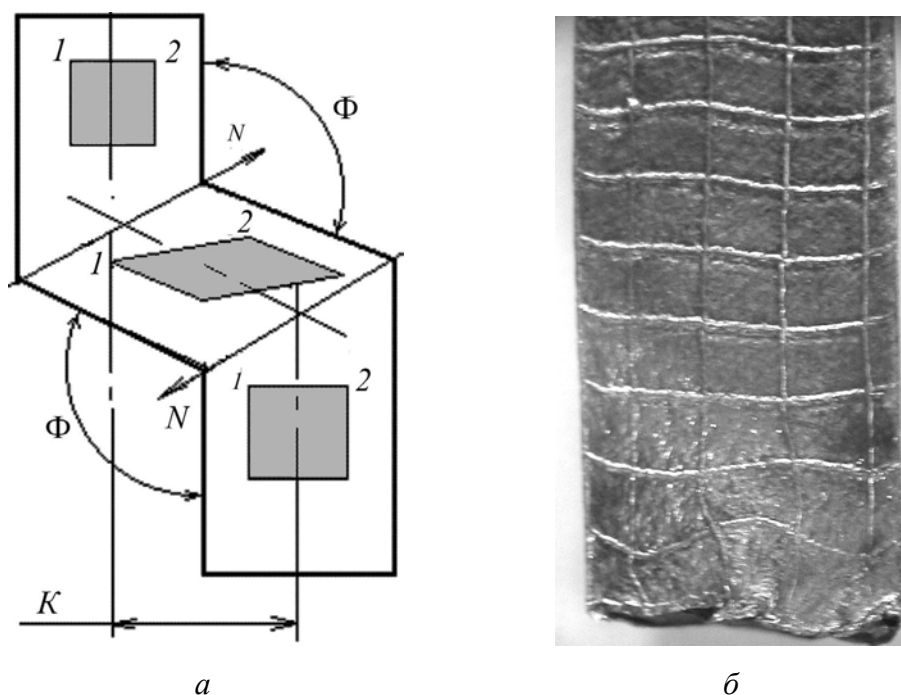


Рис. 1. Схема РКУП–ПК (где N – направление сдвига, K – параметр смещения каналов, Φ – угол пересечения вертикальных и соединяющего их каналов) (а) и вид сетки с исходной прямоугольной формой ячеек после одного цикла прессования (б)

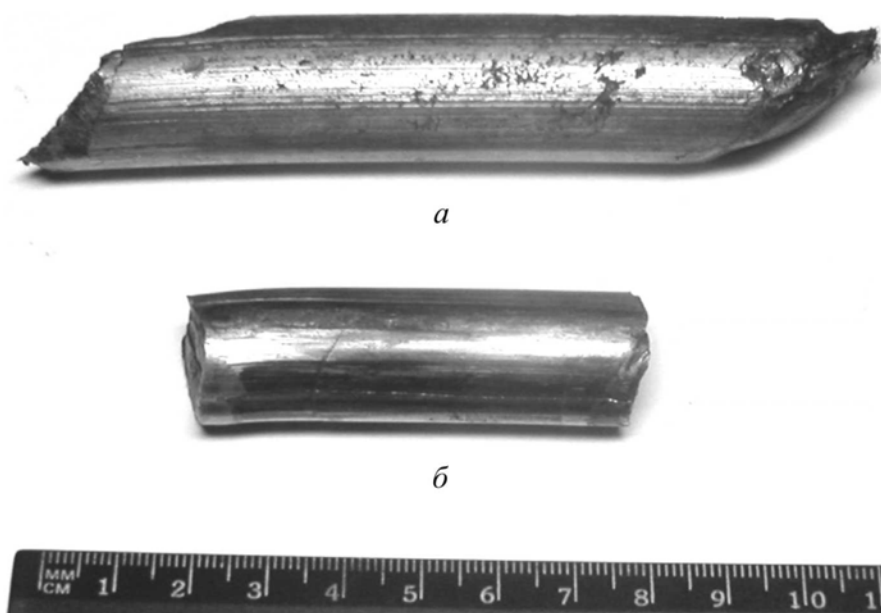


Рис. 2. Общий вид медных заготовок после РКУП: a – по общепринятой схеме с углом пересечения каналов 90° , b – в параллельных каналах с углом их пересечения 100°

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° . 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

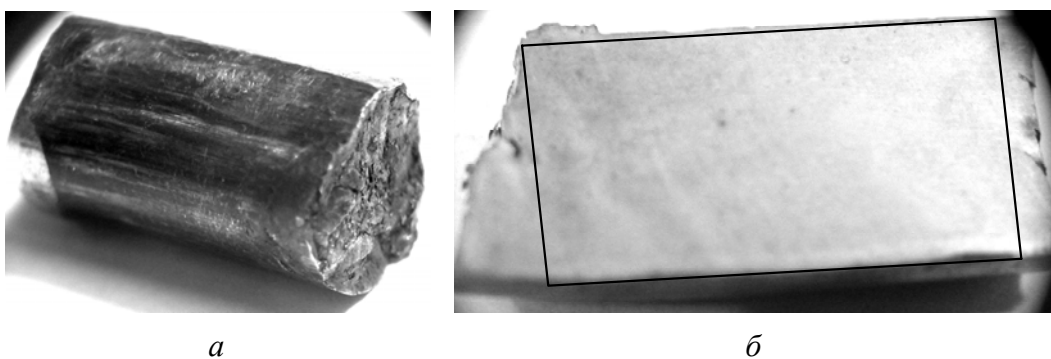


Рис. 3. Общий вид (а) и макроструктура (темплет) (б) заготовки после четырех циклов РКУП–ПК с соотношением длины к диаметру, равным 2

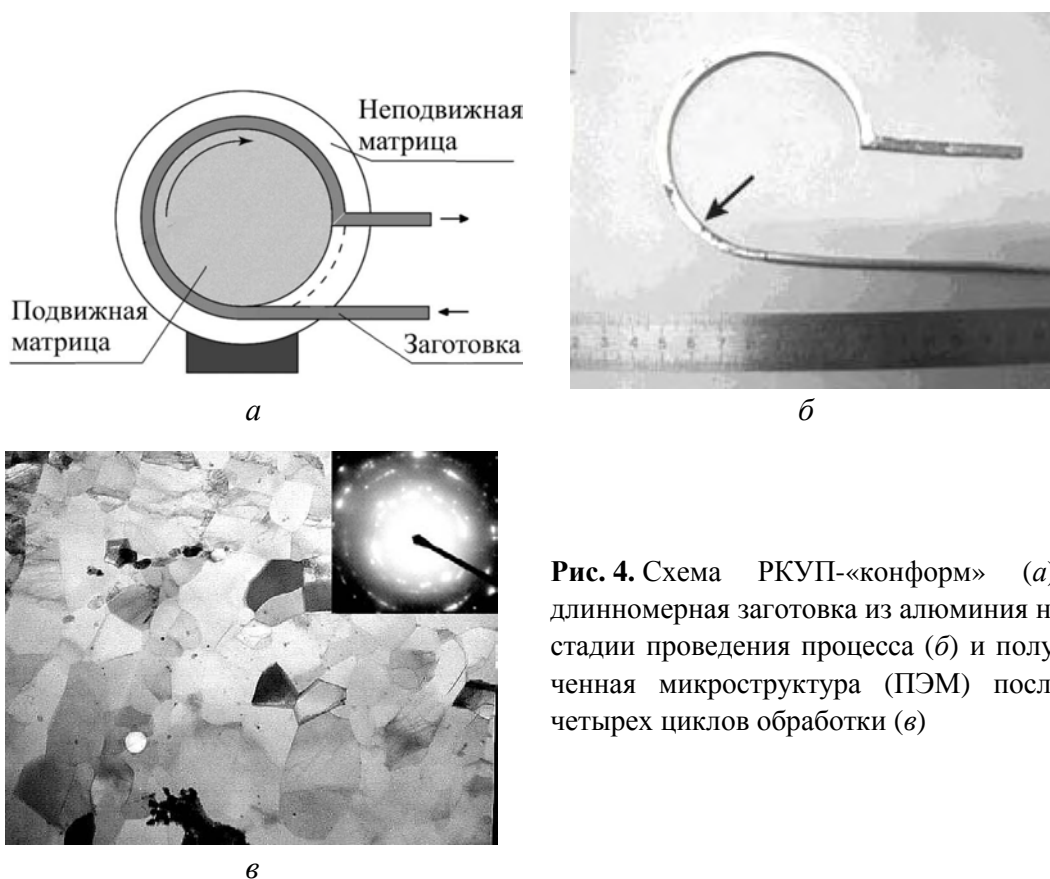


Рис. 4. Схема РКУП-«конформ» (а), длинномерная заготовка из алюминия на стадии проведения процесса (б) и полученная микроструктура (ПЭМ) после четырех циклов обработки (в)

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 2.4×2.6 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.

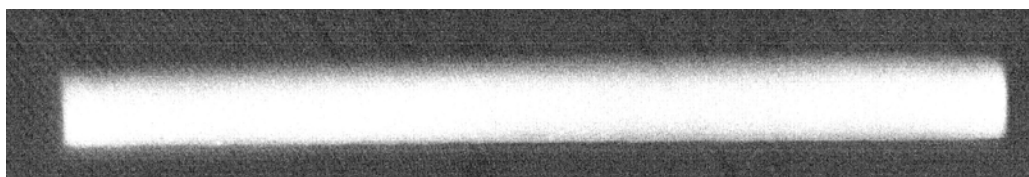


Рис. 5. Рентгеноскопический снимок УМЗ-образца диаметром 11 mm из сплава ВТ1-0, полученного РКУП ($e = 9$) и последующей экструзией ($e = 1.2$)

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, Φ – 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° angle of channels intersection, b – in parallel channels with the intersection angle of 100°

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 ($e = 1.2$)