

УДК 539.21

Г. И. РААБ

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены теоретические, технологические и практические аспекты проблемы получения ультрамелкозернистых (УМЗ) металлических материалов. *Интенсивная пластическая деформация; ультрамелкозернистая структура; равноканальное угловое прессование; технологичность; прочность; пластичность*

Развитие современного материаловедения направлено на получение уникальных свойств металлических материалов за счет формирования в материалах особых структур зеренного типа с размером зерен менее одного микрона [1]. Известны методы интенсивной пластической деформации (ИПД) для формирования таких структур в объемных материалах [1–3], как правило, за счет поэтапного накопления определенного уровня деформации. Однако до настоящего времени, а тематика активно развивается около 10–12 лет, реального внедрения в промышленность не происходит. Хотя следует отметить, что некоторые отрасли, например, аэрокосмическая и медицинская, проявляют интерес к объектам прикладного характера из ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов. В чем главная причина сдерживания внедрения разработок? Где та грань, которая отражает сущность проблемы? С нашей точки зрения, главной причиной такого положения является оторванность научной идеи от практического аспекта со всей его инфраструктурой, направленной на быстрое внедрение разработок. Но 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 получение УМЗ материалов предполагает, как правило, передел, например, сортового проката с размером зерен 10–100 микрон, можно сделать заключение, что основным и определяющим фактором промышленного получения объем-

ных УМЗ материалов будет являться соответствие себестоимости передела и новых потребительских свойств изделий или полуфабрикатов. Наиболее важными из потребительских свойств металлических материалов следует считать номенклатуру материалов, цену и выпускаемый сортамент, уровень и стабильность механических характеристик. В УМЗ состоянии большинства материалов привлекает значительное повышение прочностных и усталостных характеристик материалов при удовлетворительной пластичности [1]. Анализируя с этой точки зрения потребности в объемных УМЗ материалах, 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 равноканального углового прессования (РКУП). Можно с большой долей уверенности сказать, что сущность главных проблем получения УМЗ материалов находится в технологичности их производства. В первую очередь, процесс должен быть металло-сберегающим, т. е. обеспечивать высокий коэффициент использования металла (КИМ). Известно, что при РКУП по общепринятой схеме во взаимно пересекающихся каналах преимущественно под углом 90 градусов кон-

цевые участки заготовок искажаются и фактически подлежат удалению. При этом КИМ при получении штучных заготовок с отношением длины к диаметру $5 \div 7$, 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 и эффективных технологий, например, близких по производительности к прокатке для длинномерных изделий или к высокоскоростной высадке для штучных заготовок. Для реализации поставленных задач необходимо выполнить большой объем мероприятий как организационного, так и научно-технического характера. В этой связи решению этих наиболее важных задач при получении объемных УМЗ материалов посвящена представленная работа.

НАУЧНЫЙ АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ

Научный аспект проблемы связан с необходимостью формирования УМЗ структуры преимущественно с высокоугловыми разориентировками и высокой однородностью во всем объеме заготовки. Только такое состояние может привести к получению уникальных свойств [1]. Высокоугловые разориентировки отвечают за пластические характеристики металлов и, как правило, обеспечиваются деформацией высокой интенсивности [1]. Структурная однородность является важной характеристикой и, соответственно, обеспечивает однородность и стабильность наиболее важных механических свойств. Поэтому необходимо, чтобы при деформировании была реализована схема с высокой интенсивностью и однородностью деформации. Этим условиям ближе всего отвечают методы ИПД, такие как РКУП, кручение под давлением и некоторые другие [1, 2]. Учитывая, что, например, при РКУП формирование структуры происходит поэтапно за 4–8 циклов прессования (при этом накопленная деформация составляет 4,5–9 логарифмических единиц), важно оценить влияние прикладываемого характера воздействия. С нашей точки зрения, под характером воздействия следует понимать его суммарную монотонность или немонотонность. Например, при РКУП по маршруту А [2] мы имеем суммарную деформа-

цию, по нашей классификации, близкую к монотонной, так как при этом не проводится переориентация заготовки в процессе многоциклового обработки и направления главных напряжений и деформаций от цикла к циклу близки. Если заготовку вращать на 90 или 180 градусов вокруг продольной оси перед каждым последующим циклом прессования, что отвечает маршрутам B_c и C , соответственно [1, 2], то она, по нашей классификации, отвечает суммарно немонотонной деформации, так как направления главных напряжений и деформаций от цикла к циклу существенно различны. Замечено [4], что маршрут B_c (суммарно немонотонный характер воздействия) быстрее приводит к формированию зеренной структуры при одинаковой степени накопленной деформации. Сравнивая минимальные размеры полученных фрагментов для маршрутов А и B_c , можно отметить, что они очень близки. При этом текстурные характеристики и дефектность структур (плотность дислокаций) также близки. Наиболее существенная разница наблюдается в состоянии границ. Для одинаковой накопленной степени деформации при использовании маршрута B_c формируются преимущественно высокоугловые, а при использовании маршрута А преимущественно малоугловые границы [1, 4]. В [1] показано, что высокоугловые границы наиболее предпочтительны для повышения пластических характеристик материалов, и можно предположить, что при деформации они могут способствовать «включению» механизма зернограницного проскальзывания, являющегося доминирующим для явления сверхпластичности металлов [5].

Энергетическая оценка процесса в зависимости от характера деформационного воздействия

Проанализируем энергозатраты при монотонной пластической (МП) и немонотонной пластической (НП) деформации. Составим и сравним уравнения энергозатрат для: 1) МП деформации, приводящей к образованию преимущественно субзеренной фрагментированной структуры, и 2) НП деформации при неизменной площади поверхности (формы) материала¹, результатом которой являет-

¹ При холодной интенсивной деформации (больших деформациях) затраты на упругую деформацию и связанные с изменением энтропии $T\Delta S$ малы и обычно не учитываются.

ся формирование зерен [5]:

$$W_M = W_{н.п.} + W_c + \Delta Q; \quad (1)$$

$$W_M = W_3 + \Delta Q, \quad (2)$$

где W_M — механическая энергия деформации; $W_{н.п.}$ — энергия, затрачиваемая на образование внешней поверхности; W_c и W_3 — энергии, затрачиваемые на образование внутренней поверхности, т. е. границ субзерен и зерен; ΔQ — рассеяние энергии.

Вычитая из первого второе уравнение для случая равных W_M и ΔQ , получим

$$W_3 = W_c + W_{н.п.} \quad (3)$$

После больших деформаций форма мелких зерен и субзерен близка к равноосной. При равенстве их по размеру, следовательно, и по площади представим (3) в виде

$$S_3(\gamma_{гз} - \gamma_{гс}) = \gamma_{п}\Delta S, \quad (4)$$

где $\gamma_{гз}$ и $\gamma_{гс}$ — соответственно поверхностные энергии большеугловой и малоугловой границы, $\gamma_{п}$ — энергия внешней поверхности материала; S_3 и ΔS — соответственно площади зерен (площади субзерен и зерен приравнены) и приращенной внешней поверхности.

Согласно [6] $\gamma_{гс} \sim 0,3 \text{ Дж/м}^2$, $\gamma_{гз} = \gamma_{п} \sim 1 \text{ Дж/м}^2$. Подставляя эти значения в (4), получим $2/3S_3 \approx \Delta S$. Сравнительная оценка релаксационных частей уравнений (1) и (2) показывает, что на образование новой внешней поверхности при МД тратится столько энергии, сколько её расходуется на формирование 1/3 зерен при НМ без формоизменения.

Полученный результат подтверждается экспериментальными данными: в железе после волочения [7] и в никеле после прокатки [8] с большими вытяжками, соответствующими $e \sim 4,5-6$, формируются субзерна (фрагменты) $\sim 0,1 \text{ мкм}$, а после РКУ прессования по оптимальному маршруту с аналогичными степенями деформации — зерна [1].

Анализ взаимодействия дислокаций с поверхностями в зависимости от характера деформационного воздействия

Поглощение границами решеточных дислокаций (РД) ведет к заметному увеличению угла разориентировки и изменению энергетического состояния границ, если $J_{вх}b_S \gg$

$\gg J_{вых}b_{S'}$, где слева в неравенстве приведено произведение потока на вектор Бюргерса, входящих в границу дислокаций, а справа — аналогичное произведение для дислокаций, выходящих из границы.

Количество дислокаций и их частей, остающихся в поверхностях субзерен при монотонной и немонотонной деформации существенно отличаются. Произведем качественную оценку величины приращения угла разориентировки границ в результате накопления внесенных зернограницных дислокаций (ЗГД).

Монотонная деформация. Пусть дислокация с вектором Бюргерса b_S перемещается из зерна S в зерно S' , имеющие простые кубические решетки, преодолевая разделяющую их границу наклона, и выходит в зерно S' с измененным вектором Бюргерса $b_{S'}$ (рис. 1).

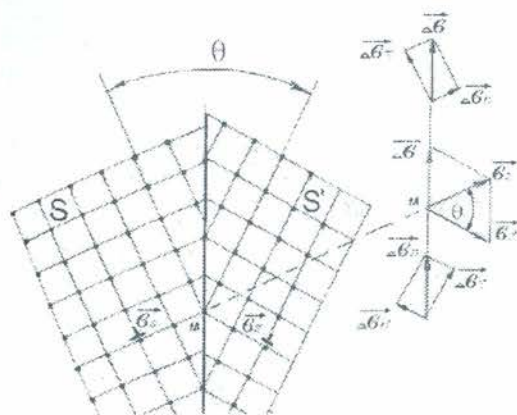


Рис. 1. Схема взаимодействия решеточных дислокаций с границей

Остающаяся в границе часть дислокации, известная как внесенная зернограницная дислокация (ЗГД) или как дислокация ориентационного несоответствия (ДОН) [9], имеет разностный вектор Бюргерса

$$\Delta b = b_S - b_{S'}. \quad (5)$$

Вклад в стационарное увеличение угла θ вносят лишь сидящие компоненты ЗГД с векторами Бюргерса, нормальными к плоскости границы. Поскольку модули входящей и выходящей дислокаций должны соответствовать постоянной решетки, то $|b_S| = |b_{S'}|$ и модуль вектора Бюргерса сидячей компоненты ЗГД равен

$$|\Delta b_n| = |\Delta b| \sin(\theta/2) = 2|b_S| \sin^2(\theta/2). \quad (6)$$

Проницаемость малоугловых границ для РД высока. Лишь часть потока РД — J_v , перемещающихся под действием малых напряжений $\tau \sim 0,3G\theta$ или имеющих малую кинетическую энергию $fv \cos(\alpha)$, вследствие малого

значения фактора Шмидта (α — угол между векторами силы f , действующей на дислокацию, и её скоростью v), «налипает» в границах

$$J_b = J - J_n, \quad (7)$$

где J — поток подвижных дислокаций, J_n — поток дислокаций, вышедших на внешнюю поверхность.

Угол разориентировки малоугловых границ $\theta_m = b/h$, где h — расстояние между дислокациями в стенке. Следовательно, приращение угла $\Delta\theta_m$ пропорционально $|\Delta b_n|$ и J_b

$$\Delta\theta_m \propto J_b |\Delta b_n| = J_b 2|b_s| \sin^2(\theta/2). \quad (8)$$

При монотонной деформации с $e \geq 3$ площадь границ фрагментов $S_f \sim \text{const}$ [9], а площадь внешней поверхности, как правило, существенно увеличивается, дислокационные потоки $J_n \rightarrow 0$ и $J_b \ll J_n$. Следовательно, приращение $\Delta\theta_m$ мало, так как определяется произведением малых величин.

Немонотонная деформация. Компоненты внесенных ЗГД с вектором Бюргерса, лежащим в плоскости границ, имеют возможность скольжения в них под действием больших напряжений и/или термической активации от деформационного разогрева [9]. При повышении плотности внесенных дислокаций до критических значений релаксация упругих напряжений осуществляется путем стока дислокаций к стыкам границ и/или в результате делокализации ядер дислокаций. По-видимому, имеют место оба процесса. Энергия ядра дислокации составляет порядка 10% от её полной энергии [9], и соответствующего рассеяния энергий ядер дислокаций за счет делокализации, по-видимому, недостаточно для релаксации напряжений. Поэтому при измельчении зерен до нанокристаллических размеров ЗГП может стать активным механизмом деформации, приводящим к релаксации напряжений, что следует не только из экспериментов [1], но и из нижеприведенного формального анализа.

Очевидно, что малые изменения формы и площади внешней поверхности образца при РКУП накладывают такие же ограничения на макроскопический очаг деформации и его части. Полагая, что формоизменение отсутствует вовсе, получим на любой прямой, пересекающей очаг деформации, сумму диагональных компонент тензоров равной нулю. (Основной вклад в деформацию дают недиагональные компоненты тензоров, приводящие к развитию ротационно-сдвиговых мод деформации).

Вследствие малых приращений внешней поверхности при ИПД соответствующий поток дислокаций также можно приравнять к нулю. Тогда и сумма потоков дислокаций через границы фрагментов должна быть равна нулю:

$$J = \sum \iint \rho v_n dS_f = 0, \quad (9)$$

где ρ — плотность дислокаций; v_n — скорость, нормальная к поверхности фрагмента составляющей скорости дислокаций, S_f — поверхность фрагмента.

В уравнении (9) ρ и S_f не равны нулю, так как деформация осуществляется и фрагменты образуются. Если предположить, что и нормальные составляющие скорости решетчатых дислокаций к поверхности фрагмента также не равны нулю, то их потоки через границы фрагментов должны иметь разные знаки. Но это противоречит эксперименту: выше отмечалось, что результатом структурных изменений при больших деформациях является формирование однородных и стабильных в размерах фрагментов. Следовательно, $v_n = 0$ или эта скорость настолько мала, что кинетической энергии дислокаций недостаточно для их выхода из границ. В этом случае деформация осуществляется дислокациями, имеющими лишь касательные к поверхности фрагментов составляющие скорости v_τ , т.е. посредством зернограницных дислокаций, скольжение которых в плоскости границ приводит к ЗГП и дополнительному увеличению угловых разориентировок фрагментов.

$$\Delta\theta_n \propto J(|\Delta b_n| + |\Delta b_\tau|) = J b_s [\sin(\theta/2) + \cos(\theta/2)]. \quad (10)$$

Из сравнения соотношений (8) и (10) видно, что $\Delta\theta_n \gg \Delta\theta_m$, особенно при малых углах θ .

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ

Научно-технологические аспекты проблемы в основном связаны с созданием однородных деформационных полей, отвечающих за однородность структурного состояния и технологичность процессов.

Следует иметь в виду, что при пластическом формоизменении необходимым фактором является обеспечение контролируемого контакта заготовки с формообразующим инструментом (при наличии смазочного слоя,

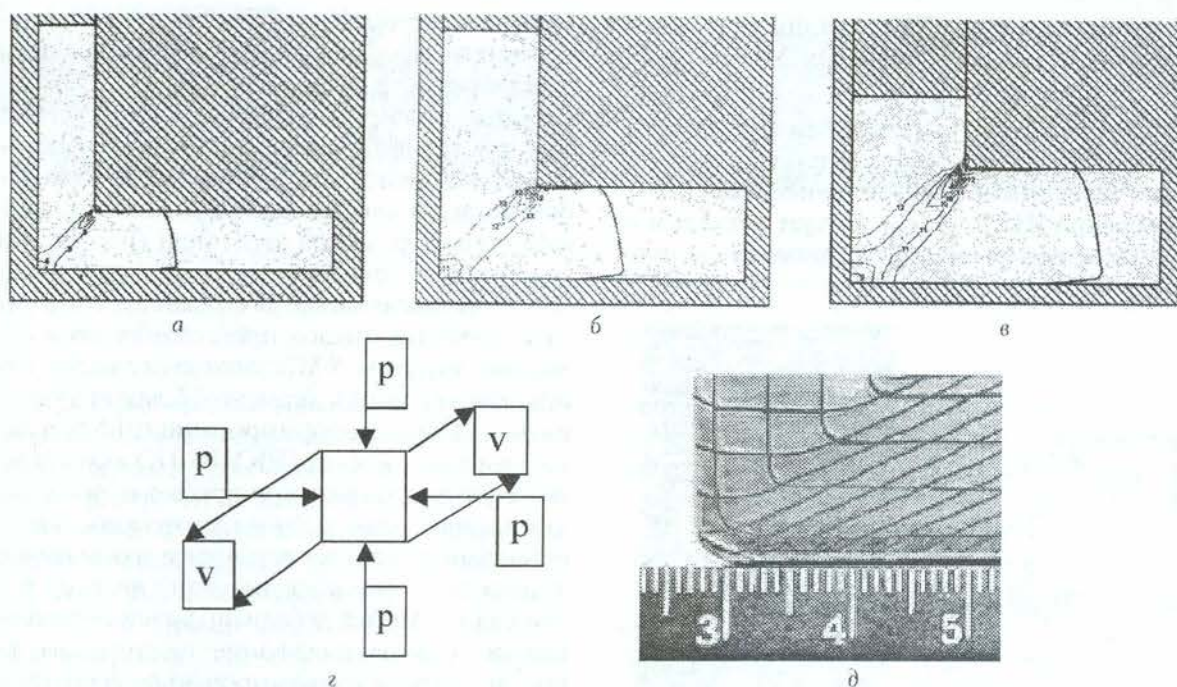


Рис. 2. Распределение значений интенсивности скоростей деформации в очаге деформации (а, б, в) при РКУП заготовок технического титана диаметром 20, 40 и 60 мм соответственно. Представленные картины получены математическим 2D-моделированием; з — схема воздействия сил (p) и скоростей (v) на элементарный объем в очаге деформации и схема трансформации этого объема в очаге деформации (д)

естественно), и это является гарантией стабильности и повторяемости процесса. Поэтому, обращаясь к первой части проблемы, связанной с получением однородной деформации и структуры, отметим, что, например, для РКУП важна геометрия формообразующих каналов [10]. При оптимальной геометрии, обеспечивающей контролируемый контакт заготовки с инструментом, получены образцы из меди М1 и титана ВТ1-0 с однородным деформированным состоянием в поперечном и продольном сечениях для стадии устойчивого течения материала [10]. Исследуя интенсивность воздействия при РКУП, можно отметить, что деформация порядка $\epsilon = 1$ для любого типоразмера заготовок накапливается в довольно узком очаге деформации. Например, для сечения $\varnothing 60$ мм — в полосе шириной около 15 мм, для сечения $\varnothing 40$ мм — в полосе шириной около 10 мм, а для сечения $\varnothing 20$ мм — в полосе шириной около 4 мм. При этом отношение удельной площади очага к его удельному объему для сечения $\varnothing 20$ мм увеличивается примерно в 3 раза по сравнению с сечением $\varnothing 60$ мм, а интенсивность скоростей деформации возрастает с величины 0,1 до 0,5 (рис. 2). Такие изменения должны влиять на структурообразование, что и подтверждено данными, полученными

нами при РКУП заготовок технического титана диаметром 20, 40 и 60 мм со скоростью прессования 6 мм/с [10]. Причем наибольшая разница по среднему размеру зерен для минимального ($\varnothing 20$) и максимального ($\varnothing 60$) диаметров составила 0,15 мкм. Полученные данные показывают влияние внешней поверхности, объема очага деформации и интенсивности деформации на структурообразование. При этом можно сделать заключение, что с увеличением отношения площади очага деформации к его объему, при прочих равных или близких к ним условиях (марка прессуемого материала, скорость прессования, трибология, гидростатическое давление и т. д.), следует ожидать более эффективного структурообразования и большего измельчения зерен. К тому же более эффективному измельчению структуры при РКУП в условиях такого узкого очага деформации и разрыва скоростей способствует реализуемая схема деформации, которая ближе к осадке со сдвигом в стесненных условиях (см. рис. 2, з, д) или чистому сдвигу [11], а не к простому сдвигу, как обычно ее представляют [1].

Технологический аспект проблемы

Технологический аспект проблемы лежит в плоскости создания и реализации высоко-

эффективных схем РКУП для получения как штучных, так и длинномерных УМЗ заготовок.

Получение штучных УМЗ заготовок. Как было отмечено, важным при получении штучных УМЗ заготовок является необходимость повышения КИМ, так как потери металла могут существенно снизить эффективность производства.

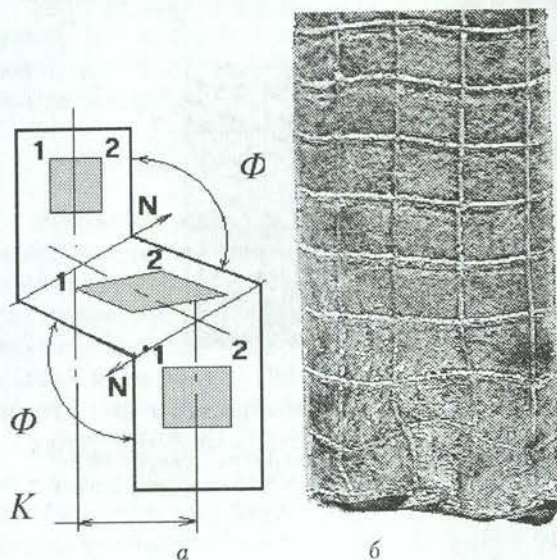


Рис. 3. Схема равноканального углового прессования в параллельных каналах, где N — направление сдвига, K — параметр смещения каналов, Φ — угол пересечения вертикальных и соединяющего их каналов (а), и вид сетки с исходной прямоугольной формой ячеек после одного цикла прессования (б)

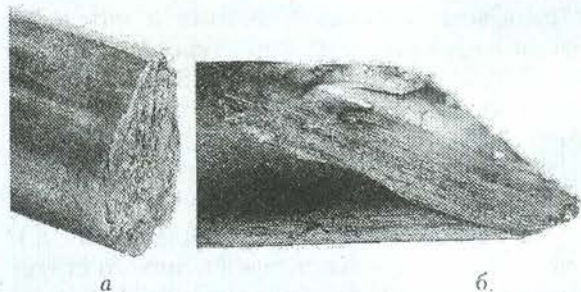


Рис. 4. Форма концевой части медной заготовки: а — после четырех циклов прессования РКУП-ПК с углом пересечения каналов 100 градусов, б — после четырех циклов прессования РКУП по общепринятой схеме с углом пересечения каналов 90 градусов

Эту задачу для способа РКУП можно решить, если использовать схему деформирования, представленную на рис. 3, а [12]. Варьируя параметр K и угол 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, обеспечивая при этом эффективную для формирования зеренной структуры суммарно немонотонную за цикл обработки деформацию и значительно уменьшить искажение концевых частей заготовки (рис. 4). Это приводит не только к резкому повышению КИМ до значений 0,9 и снижению в два раза количества циклов прессования, но и 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 однородном деформированном состоянии после одного цикла прессования (см. рис. 3, в) и даже в заготовке с отношением длины к диаметру около двух после четырех циклов прессования получена однородная УМЗ структура (рис. 5, а, б). Полученное однородное поле микротвердости в продольном и поперечном сечениях ($HV = 1530 \pm 20$ МПа) также свидетельствует о структурной однородности и однородности механических свойств в объеме заготовки. Прочность медной заготовки после проведенной обработки возросла со 150 до 420 МПа при пластичности $\delta = 15-18\%$, что сопоставимо со значениями, полученными после 8–12 циклов РКУП меди по общепринятой схеме с углом пересечения каналов 90 градусов. Также в качестве положительного фактора следует отметить, что заготовка после деформации РКУП-ПК сохраняет свое исходное вертикальное положение. Это весьма удобно при автоматизации процесса, например, на высокопроизводительных роторных линиях. Оценивая в комплексе преимуществ представленной схемы, следует ожидать создания высокоэффективных процессов на ее основе.

Получение длинномерных УМЗ заготовок. Наиболее технологичная схема РКУП для получения длинномерных УМЗ заготовок была предложена В. М. Сегалом [2], в ее основе лежит «конформ»-процесс. Процесс получил свое развитие в ряде его модификаций применительно к получению алюминиевых лент [3]. Общеизвестно, что получение длинномерных заготовок, в том числе и

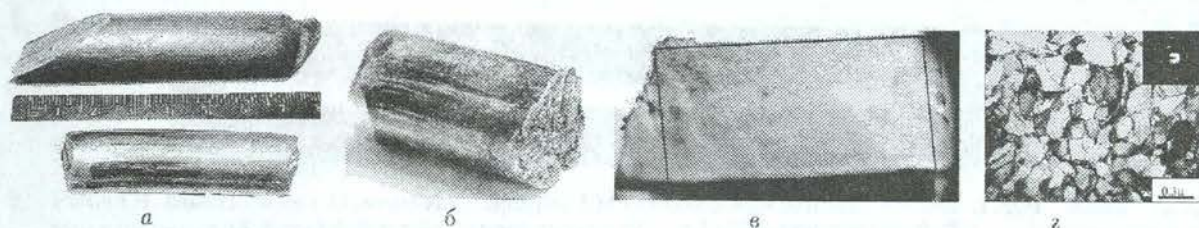


Рис. 5. Общий вид медных заготовок после РКУП по общепринятой схеме с углом пересечения каналов 90 градусов и РКУП-ПК с углом пересечения каналов 100 градусов (а), общий вид заготовки после четырех циклов РКУП-ПК с соотношением длины к диаметру, равным 2 (б), ее макроструктура (темплет) (в) и микроструктура (ПЭМ) (г)

в УМЗ состоянии, по сравнению со штучным является более эффективным как при производстве, так и при последующей переработке. Например, КИМ процесса можно довести до значений, близких к единице, так как доля дефектных концевых частей в длинномерной заготовке может составлять доли одного процента. Производство УМЗ материалов можно легко встроить в существующие высокопроизводительные процессы, так как известно, что способ «конформ» обеспечивает высокие скорости обработки, сопоставимые с прокаткой. К тому же длинномерные изделия, что вполне объективно, наиболее технологичны и при последующем переделе как способами ОМД, так и лезвийной обработкой, например, на высадочных или токарных автоматах.

Исследования способа РКУП-«конформ» (см. рис. 6), проведенные нами на чистом алюминии при комнатной температуре, показывают высокую эффективность такого процесса [13, 14]. После четырех циклов обработки в материале была сформирована достаточно однородная УМЗ структура с размером зерен менее одного микрона (см. рис. 6, в) и получены высокопрочные образцы прямоугольного сечения $2,4 \times 2,6 \text{ мм}^2$ длиной около 300 мм. Однако следует учитывать, что для реализации способа необходимо создание специ-

ального 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, как правило, для нужд производства требуется круг, как наиболее технологичный при последующей обработке. Передел в круг также потребует некоторых затрат.

Суммируя полученные результаты и тенденции развития способа РКУП-«конформ» отметим, что объективно для его реализации требуется создание более сложного, наукоемкого и дорогого оборудования по сравнению с оборудованием для производства штучных заготовок, и, соответственно, он будет наиболее эффективен для серийного или массового производства. Высокая рентабельность и окупаемость такого процесса наиболее вероятны в этих условиях.

Технологичность УМЗ материалов. Большой интерес вызывает возможность последующей обработки полученных, в том числе и способом РКУП, УМЗ материалов. С этой целью проведены исследования деформируемости на примере титанового сплава ВТ1-0 в УМЗ состоянии, полученного РКУП со степенью накопленной деформации $\epsilon = 9$. Для комнатной температуры по методике, пред-

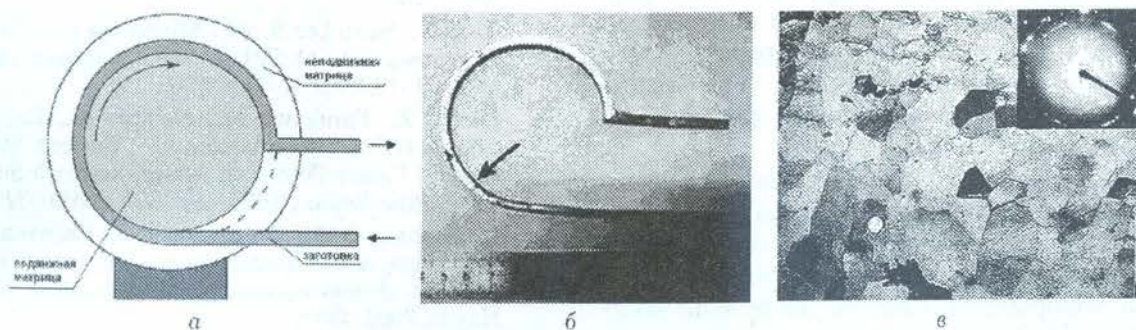


Рис. 6. Схема РКУП-«конформ» (а), длинномерная заготовка из алюминия на стадии проведения процесса (б) и полученная микроструктура (ПЭМ) после четырех циклов обработки (в)



Рис. 7. Рентгеноскопический снимок УМЗ образца диаметром 11 мм из сплава ВТ1-0, полученного РКУП ($\epsilon = 9$) и последующей экструзией ($\epsilon = 1,2$)

ставленной в [15], была построена диаграмма пластичности, которая легла в основу исследований деформируемости сплава методом экструзии. В результате исследований было показано, что УМЗ материал в процессе деформирования продолжает упрочняться. При этом деформация до степени 75% ($\epsilon = 1,2$) приводит к повышению прочности с 750 до 1050 МПа с уровнем пластичности $\delta = 10\%$ [16]. После такой обработки заготовки не имели внутренних дефектов, о чем свидетельствуют данные рентген-контроля (рис. 7). Аналогичные исследования проведены по экструзии УМЗ титанового сплава ВТ6. Экструзия УМЗ состояния при комнатной температуре со степенью около 60% ($\epsilon = 0,8$) позволила повысить прочность с 1100 до 1490 МПа с уровнем пластичности $\delta = 8\%$ [17]. 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 использовать при переделе УМЗ материалов высокопроизводительные процессы, такие как прокатка, волочение, высокоскоростная экструзия, то это не окажет существенного влияния на повышение себестоимости готовой продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным параметром эффективного формирования зернистой структуры является характер прикладываемой деформации. При этом суммарно немонотонная деформация приводит к более быстрому формированию зернистой структуры.

При РКУП наблюдается прямая зависимость между структурообразованием и удельным отношением поверхности очага деформации к его объему и интенсивностью скоростей деформации. Причем увеличение соотношения поверхности очага деформации к его объему и увеличение интенсивности скоростей деформации приводит к получению более мелкой структуры.

Большую роль для получения однородных структурных состояний РКУП играет геометрия каналов технологической оснастки. При этом существуют оптимальные ее параметры, обеспечивающие получение таких состояний.

В результате проведенных анализа и исследований показано, что использование представленных способов РКУП-ПК и РКУП-«конформ» может привести к получению качественно новых высокопрочных состояний серийных металлов и сплавов. При этом на базе этих способов возможно создание высокоэффективных комплексных технологий получения объемных высокопрочных УМЗ материалов необходимого сортамента и номенклатуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за оказанную помощь при подготовке статьи научному консультанту д-ру физ.-мат. наук Р. З. Валиеву и д-ру техн. наук Ф. З. Утяшеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
2. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука і техника, 1994. 232 с.
3. Tsuji N., Saito Lee S.-H., Minamino Y. // Mater. конф. NANO SPD2. Вена, Австрия, Декабрь 9–13, 2002. С. 479–490.
4. Horita Z., Furukawa M., Nemoto M., Langdon T. G. // Superplasticity – Current Status and Future Potential: Mater. Research Soc. Simp. Proc. Boston, 1999. Vol. 601. P. 311–322.
5. Кайбышев О. А., Утяшев Ф. З. Сверхпластичность, измельчение структуры зерен и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002. 438 с.
6. Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.

7. **Рекристаллизация** металлических материалов / Ред. Ф. Хесснер; Пер. с англ. под ред. И. В. Колецкого. М.: Металлургия, 1982. 352 с.
8. **Hughes D. A., Hausen N.** Microstructure and strength of nickel at large strains // *Acta Mater.* 2000. V. 48. P. 2985–3004.
9. **Рыбин В. В.** Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
10. **Рааб Г. И.** Развитие способа равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых материалов: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2000.
11. **Segal V. M.** // *Ultrafine Grained Materials III, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society)*. 2004. P. 413–422.
12. Пат. 2181314 РФ / Г. И. Рааб, Р. З. Валиев, Г. В. Кулясов, В. А. Полозовский. РосПатент, 2002. Бюл. № 16.
13. **Рааб Г. И., Валиев Р. З.** // *Цветная металлургия*. 2000. № 5. С. 50–53.
14. **Raab G. I., Valiev R. Z., Lowe T. C., Zhu Y. T.** // *Materials Science and Engineering*. 2004. A-382. P. 30–34.
15. **Унксов Е. П., Джонсон У., Колмогоров В. Л.** Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
16. **Рааб Г. И., Валиев Р. З.** // *Кузнечно-штамповое производство*. 1999. № 5. С. 20–22.
17. **Semenova I. P., Zhu Y. T., Raab G. I., Lowe T. C., Valiev R. Z.** // *Ultrafine Grained Materials III, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society)*. 2004. P. 463–468.

ОБ АВТОРЕ



Рааб Георгий Иосифович, зав. лабораторией НИЧ Ин-та физики перспективных материалов УГАТУ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по обработке металлов давлением (Челябинск, 2000). Иссл. в обл. ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов.