

PACS: 81.40.Ef, 81.40.-z, 81.40.Vw

В.З. Спусканюк

НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В РАЗВИТИИ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2013 года

В результате комплексных фундаментальных и прикладных исследований процессов гидроэкструзии выявлены новые возможности создания металлических наноматериалов с уникальными физическими и механическими свойствами. Представлены результаты исследований новых процессов интенсивной пластической деформации (ИПД) – равноканальной угловой гидроэкструзии (РКУГ), равноканальной многоугольной экструзии и гидроэкструзии (РКМУЭ, РКМУГ). Рассмотрены эффекты в формировании структур и свойств меди, медных и алюминиевых сплавов, титана. Кратко описаны технологические приемы и устройства, обеспечивающие высокоэффективное производство объемных заготовок, в частности многометровой длины, из субмикроскопических и нанокристаллических материалов.

Ключевые слова: гидроэкструзия, метод, устройство, интенсивная пластическая деформация, субмикроскопические и нанокристаллические материалы

У результаті комплексних фундаментальних і прикладних досліджень процесів гідроекструзії виявлено нові можливості створення металевих наноматеріалів з унікальними фізичними та механічними властивостями. Наведено результати досліджень нових процесів інтенсивної пластичної деформації (ІПД) – рівноканальної кутової гідроекструзії (РККУГ), рівноканальної багатокуткової екструзії та гідроекструзії (РКБКУЕ, РКБКУГ). Розглянуто ефекти у формуванні структур і властивостей міді, мідних та алюмінієвих сплавів, титана. Коротко описано технологічні заходи та пристрої, які забезпечують високоефективне виробництво об'ємних заготовок, зокрема багатометрової довжини, з субмікро- та нанокристалічних матеріалів.

Ключові слова: гідроекструзія, метод, пристрій, інтенсивна пластична деформація, субмікроструктурні та нанокристалічні матеріали

Введение

Развитие физики высоких давлений, физики прочности и пластичности твердых тел, теории и перспективных методов гидроэкструзии являлось одним из основных направлений научной деятельности Донецкого физико-

технического института (ДонФТИ) под руководством академика АН УССР А.А. Галкина. Можно вспомнить выполненные с непосредственным участием А.А. Галкина работы, посвященные разработке дислокационной теории гидроэкструзии, изучению поведения дислокаций в гидростатически сжатых кристаллах, переходу твердых тел из хрупкого в пластичное состояние, созданию технологий получения с использованием гидроэкструзии сверхпроводящего многожильного (в десятки миллионов жил) провода, производства металлорежущих и штамповых инструментов повышенного качества. Работы А.А. Галкина с соавторами, вошедшие в цикл «Разработка и исследование сверхпроводников с высокими критическими параметрами», в 1982 г. удостоены Государственной премии УССР.

В 80–90-е гг. теоретические и экспериментальные исследования процессов гидроэкструзии успешно развивались в подразделениях, руководимых чл.-кор. АН УССР, д.т.н. Б.И. Бересневым, д.т.н. В.П. Буряком, д.т.н. А.П. Гетманским, д.ф.-м.н. В.И. Зайцевым, д.т.н. В.З. Спусканюком, д.т.н. Ю.Ф. Черным. Создан ряд моделей процесса гидроэкструзии, получены приближенные аналитические решения задач о динамике процесса, определении границ очага пластической деформации, распределении скоростей течения, параметров напряженно-деформированного состояния металла в конической матрице конечных размеров. Созданы научные основы нестационарной холодной гидроэкструзии, разработаны эффективные методы гидроэкструзии с противодавлением, при повышенных и низких температурах, оригинальные прессы и устройства. Установлены закономерности изменения структуры и свойств широкого круга металлов, сплавов и композиционных материалов в результате больших пластических деформаций под высоким давлением, наследственного влияния деформации на структурные и фазовые превращения при термическом воздействии [1]. На основе результатов исследований созданы и внедрены на десятках машиностроительных заводов установки для гидроэкструзии заготовок, в том числе автоматизированные, и основанные на методах гидроэкструзии принципиально новые ресурсосберегающие технологические процессы изготовления высококачественной продукции. За создание оборудования и разработку способов производства методами гидроэкструзии высококачественных изделий к.т.н. В.С. Ковико и д.т.н. В.З. Спусканюк с соавторами удостоены в 1985 г. Премии СМ СССР.

Интеллектуальный потенциал и имеющаяся база экспериментального оборудования позволили ученым ДонФТИ успешно включиться в развитие нового в мировой науке направления исследований методов получения, структуры и свойств наноматериалов. Это направление сформировалось в последние десятилетия на стыке физики твердого тела, физического материаловедения и обработки металлов давлением. Среди многообразных научных достижений здесь уместно отметить формирование нанокристаллического (НК) либо субмикрокристаллического (СМК) состояния металлов и сплавов в объемных образцах методами ИПД. Характерной особенностью процессов явля-

ется реализация интенсивных деформаций простым сдвигом, возможность накопления больших пластических деформаций в результате многократного деформирования заготовок с сохранением их исходных поперечных размеров. Процессы ИПД осуществляют в условиях высокого давления, которое обеспечивает повышение пластичности металлов и эффективности фрагментации кристаллов. В результате ИПД размеры зерен уменьшаются до субмикронных значений, формируется наноструктура с большими углами ориентировки границ зерен, вследствие чего достигается значительное повышение практически важных свойств деформированных металлов, в ряде случаев получают качественно новые свойства. Для ряда промышленных отраслей, таких как авиационная, космическая, электротехническая, электроника, производство медицинской техники, требуются материалы с высокими служебными свойствами, которые достигаются в СМК-состоянии металлов и сплавов. Потребность в таких материалах измеряется всего десятками и сотнями тонн, но их производство является высокорентабельным. Для получения таких полуфабрикатов и изделий из них с высоким уровнем физико-механических свойств в мировых научных центрах разработаны такие методы ИПД, как равноканальная угловая экструзия (РКУЭ), которую называют еще равноканальным угловым прессованием (РКУП), винтовая экструзия, всесторонняя ковка, аккумулялирующая прокатка и др.

В настоящей работе приведены результаты выполненных в ДонФТИ исследований и разработок методов получения НК- и СМК-материалов, основанных на использовании процессов экструзии и гидроэкструзии. Это метод РКУГ, который обеспечивает, как и РКУЭ, формирование наноструктур и уникальных свойств материалов, но имеет неоспоримые технологические преимущества перед РКУЭ в получении длинномерных прутков и обработке высокопрочных материалов. Это методы РКМУЭ и РКМУГ. Развитие перспективных методов РКУГ, РКМУГ и РКМУЭ, комбинированное их использование совместно с традиционными методами обработки металлов давлением открывают широкие возможности производства наноматериалов. В статье приведены также некоторые результаты применения пакетной гидроэкструзии для получения нановолоконных композитов.

Теория процессов и устройства для ИПД материалов

Процесс равноканальной угловой гидроэкструзии. При реализации разработанного нами метода РКУГ заготовка выдавливается из канала контейнера через угловую матрицу жидкостью, сжатой до высокого давления (рис. 1) [2,3]. Для обеспечения возможности многократного деформирования одной и той же заготовки диаметр канала угловой матрицы на выходе выполнен несколько большего размера, чем на входе (последний равен диаметру калибрующего пояска конической матрицы). Это позволяет повторно загружать в контейнер и осуществлять РКУГ заготовки без дополнительной операции по ее утолщению.

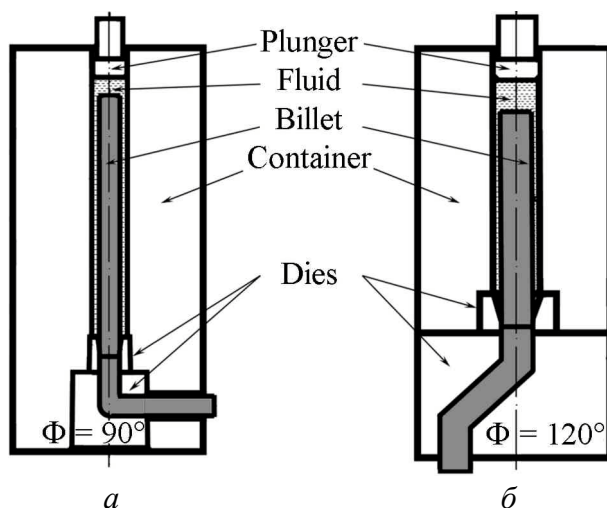


Рис. 1. Схемы устройств для угловой гидроэкструзии с одной (а) и двумя (б) зонами сдвига

Для снижения влияния контактного трения заготовки при РКУЭ рекомендуется [4] использовать устройства с подвижными стенками (заготовки имеют квадратное либо прямоугольное поперечное сечение). Однако такие устройства являются более сложными, причем в них хотя бы одна стенка должна оставаться неподвижной, т.е. устранить отрицательное влияние трения в контейнере не удастся. В связи с вышесказанным при РКУЭ относительная длина заготовок обычно не превышает шести диаметров, а необходимость удаления дефектных концов приводит к значительным отходам при многократной деформации заготовок.

Большая эффективность применения РКУГ по сравнению с РКУЭ связана в первую очередь с отсутствием трения заготовки о стенки контейнера, с возможностью обработки длинномерных заготовок и достигаемым при этом повышением производительности труда и коэффициента использования металла. Даже при использовании эффективных смазочных веществ (значениях фактора трения $m = 0.1-0.3$) вследствие влияния контактного трения давление РКУЭ больше, чем при РКУГ, в 1.8–2.4 раза для заготовок с относительной длиной $l/d = 8-10$ и в 3.5–5.0 раз – для $l/d = 15-20$. При РКУГ относительная длина части заготовки, контактирующей с входным каналом угловой матрицы, не превышает трех диаметров.

Разработан метод верхней оценки давлений РКУЭ и РКУГ заготовок через матрицу с закругленным внешним углом, учитывающий комплексное влияние геометрии матрицы, упрочнения материала и условий трения. Установлено, что при РКУГ работа сил контактного трения равна работе пластической деформации материала при величине фактора трения $m = 0.2-0.3$ и в 3 раза больше ее при $m = 0.55-0.65$. На базе учета комплексного влияния фактора трения, угла пересечения каналов матрицы и упрочнения материала получена минимальная верхняя оценка давлений РКУГ заготовок через матрицу без закругления внешнего угла [5,6].

Несмотря на сокращение относительной площади контакта заготовки с инструментом, при РКУГ также целесообразно использовать эффективные смазочные вещества. Известно, что при определенных условиях прямой

гидроэкструзии возможно обеспечение экранирования заготовки в конической матрице. Нами впервые показана возможность экранирования заготовки в угловой матрице при РКУГ. При высокой вязкости смазочного слоя и вследствие положительного влияния жидкости высокого давления в установившейся стадии РКУГ предотвращалось контактирование заготовки с инструментом.

Впервые установлены основные положения механизма влияния угла пересечения каналов матрицы и фактора трения на распределение скоростей деформаций заготовок при РКУЭ и РКУГ через матрицу без закругления внешнего угла [7]. Показано, что в случае обработки идеально пластического материала максимальные значения скорости деформации $\dot{\epsilon}$ на оси прутка соответствуют стадии заполнения зазора между заготовкой и инструментом у внешнего угла, в частности при: $m = 0$ и $\Phi = 90^\circ$; $m = 0.6$ и $\Phi = 120^\circ$. При деформации упрочняемого материала максимальные значения $\dot{\epsilon}$ установлены накануне заполнения этого зазора, в частности при: $m = 0-0.2$ и $\Phi = 90^\circ$; $m = 0.5-0.6$ и $\Phi = 120^\circ$. Установлено, что максимальные значения скоростей деформаций идеально пластического материала в 1.5–2.5 раза больше, чем упрочняемого материала. Показано также, что скорость деформации упрочняемого материала на входном участке зоны пластической деформации меньше до двух раз, чем на выходном.

Получены выражения для определения значений скоростей деформаций при различных условиях РКУГ, необходимые для оценки напряжения сдвига материала и технологической пластичности заготовок. Для оценки среднего по очагу сдвига значения скорости деформации получено выражение

$$\dot{\epsilon} = \frac{2V_0 \operatorname{ctg} \frac{\Phi}{2}}{D\sqrt{3} \operatorname{tg} \frac{\Psi}{2}}, \quad (1)$$

где V_0 – скорость прессования; ψ – угол деформационной зоны, $\psi = \pi - \Phi - \arccos \frac{\tau}{k}$, τ – напряжение контактного трения.

Средняя скорость деформации представительного объема материала на некотором расстоянии r от вершины внутреннего угла матрицы определяется в виде

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon V_0 \cos^2 \varphi}{r\psi + 0.2\delta}, \quad (2)$$

здесь ϵ – интенсивность деформации, φ – угол между границей зоны сдвига и горизонтальной линией, δ – ширина канала.

Исследованы закономерности изменения давления в процессе РКУГ заготовок без пресс-остатка и по способу «заготовка за заготовкой», изучено влияние относительного объема жидкости, относительного зазора между заготовкой и стенкой контейнера и скорости истечения заготовки

на характер колебания давления РКУГ [8]. Показано, что для обеспечения стабильного протекания процесса необходимо ограничение относительного объема жидкости и увеличение скорости деформирования. Выявленные эффекты РКУГ аналогичны закономерностям прямой гидроэкструзии.

Для практического использования метода РКУГ создан ряд устройств, позволяющих с приемлемой производительностью реализовать процесс ИПД заготовок диаметром от 13 до 35 mm, в том числе с противодавлением [9]. Разработано устройство для РКУГ заготовок длиной в несколько метров (рис. 2) с использованием известного принципа устройств Т-образного типа, в которых жидкость, сжатая в вертикальном канале, перетекает в горизонтальный канал и выдавливает заготовку [10].

Разработан ряд устройств для полунепрерывной гидромеханической экструзии прутков неограниченной длины. Один из вариантов такого устройства представлен на рис. 3.

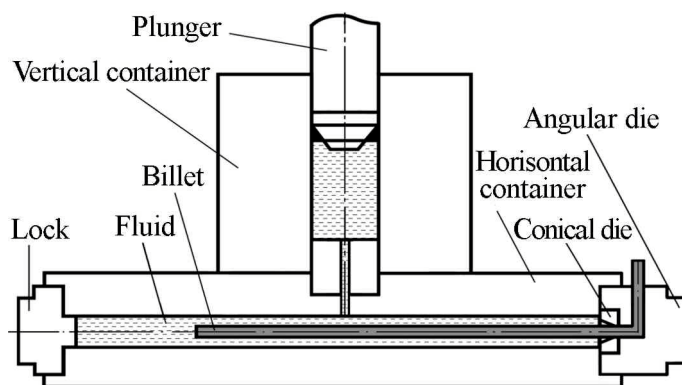


Рис. 2. Схема устройства для РКУГ с вертикальным и горизонтальными контейнерами

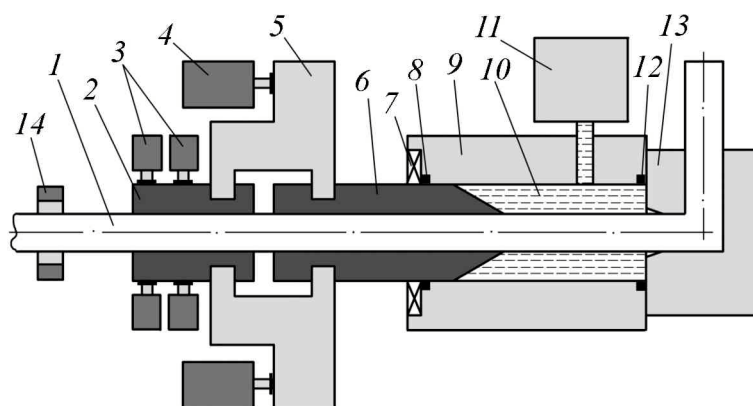


Рис. 3. Устройство для гидромеханической угловой экструзии прутков неограниченной длины: 1 – пруток, 2 – внешний зажимный патрон, 3 и 4 – автоматические гидравлические цилиндры, 5 – обойма, 6 – внутренний зажимный патрон, 7 – гайка, 8 и 12 – уплотнения, 9 – контейнер высокого давления, 10 – жидкость высокого давления, 11 – устройство для создания давления, 13 – угловая матрица, 14 – устройство для начальной загрузки прутка

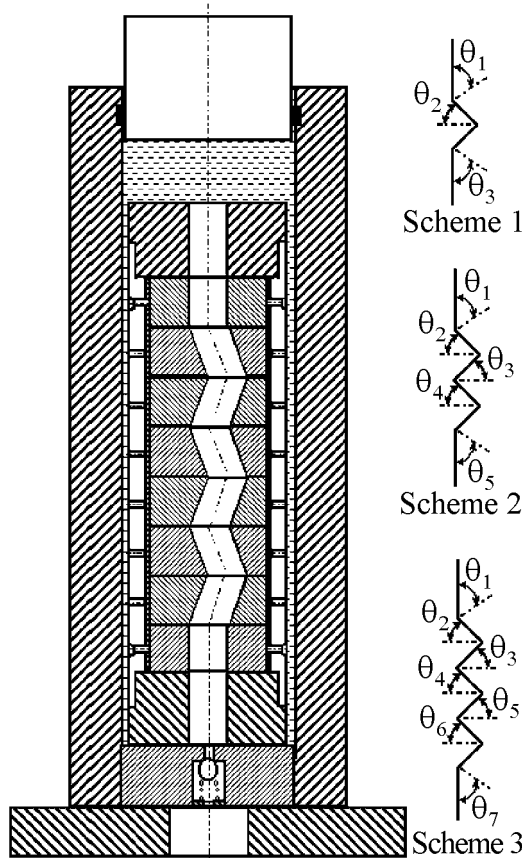


Рис. 4. Схема устройства для реализации РКМУГ

Процесс равноканальной многоугольной гидроэкструзии. Недостаток метода РКМУЭ, связанный с большими потерями на преодоление трения, эффективно устраняется при реализации процесса в режиме гидроэкструзии. Разработаны схемы РКМУГ и устройства для их реализации [11,12].

В [13,14] показано, что при РКУЭ для формирования однородной микроструктуры с большими углами разориентировки границ зерен требуется реализация ИПД, и поэтому необходимо, чтобы угол матрицы был равен или близок к $\Phi = 90^\circ$. В связи с этим считается, что при конструировании любой многоугольной матрицы необходимо обеспечить, чтобы каждая отдельная зона сдвига была связана с углом, близким к $\Phi = 90^\circ$. В разработанных нами устройствах для РКМУЭ и РКМУГ (рис. 4) наряду с углом $\Phi = 90^\circ$ используются углы $\Phi = 110-160^\circ$, благодаря

чему существенно расширяются технологические возможности методов. Применение таких устройств обеспечивает широкие возможности варьирования интенсивностей деформаций сдвига в отдельных очагах деформации, повышения или уменьшения их в каждом очередном очаге по ходу движения заготовки в канале, достижения большой накопленной степени деформации заготовки за проход по каналу при относительно малых интенсивностях деформаций в отдельных очагах. Обработка заготовок упрощается, когда входной и выходной участки канала расположены вертикально, лучше – соосно. При этом возможно использование известных устройств для загрузки заготовок в контейнер, заливки рабочей жидкости и создания противодействия на выходе из канала. Достаточно просто, путем увеличения количества деформирующих втулок в устройстве, можно продолжить канал с увеличением числа зон сдвиговой деформации, а их пространственное положение можно изменить, поворачивая втулки относительно вертикальной оси.

Давление РКМУГ (без противодействия) оценивается [3,12] в виде

$$P = 2 \sum_{i=1}^n K_{iz} \operatorname{ctg} \frac{\Phi_i}{2} + \frac{\Pi}{F} \sum_{i=0}^n K_i m_i l_i, \quad (3)$$

где K_i – напряжение пластического сдвига металла после деформации в i -й зоне сдвига; m_i и l_i – соответственно фактор трения и длина участка канала после i -й зоны сдвига; Π – периметр поперечного сечения канала; F – площадь поперечного сечения канала. Величина K_{iz} принимается равной среднегеометрическому значению напряжений сдвига металла до и после деформации в этой зоне, т.е.

$$K_{iz} = \sqrt{(K_{i-1})K_i} . \quad (4)$$

Считая форму поперечного сечения канала между зонами сдвига круглой с диаметром D и принимая для упрощения, что фактор трения на всех участках одинаковый, получим

$$P = 2 \sum_{i=1}^n K_{iz} \operatorname{ctg} \frac{\Phi_i}{2} + \frac{4m}{D} \sum_{i=0}^n K_i l_i . \quad (5)$$

Проведены оценки фактора трения путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений давления при РКМУЭ и РКМУГ. Результаты исследования свидетельствуют об эффективности использования жидкости высокого давления для реализации РКМУГ, особенно в случае деформации относительно коротких заготовок. В результате применения сжатой жидкости повышается эффективность смазочного слоя в сравнении с условиями при механической экструзии, потери на трение зависят от длины заготовки, а относительная длина канала не оказывает существенного влияния на давление экструзии. Уровень давления задается числом зон сдвига, в которых заготовка деформируется одновременно, интенсивностью деформаций сдвига и относительной длиной заготовки, определяющей размеры контактной поверхности. С увеличением относительной длины заготовки наблюдается некоторое повышение расчетного значения фактора трения (при одинаковом числе зон сдвиговой деформации), что объясняется ухудшением условий для проникновения жидкости в зазор между заготовкой и инструментом. Тем не менее установленные значения фактора трения при РКМУГ существенно меньше уровня, который соответствует по той же расчетной методике давлению РКМУЭ [12].

Целесообразность применения устройств для РКМУГ может быть обусловлена повышением производительности обработки, необходимостью снижения разовых интенсивностей деформаций высокопрочных либо малопластичных материалов, возможностью обеспечения строго регламентированного чередования величин интенсивностей и направлений сдвига для направленного формирования структуры материала.

Эффекты ИПД заготовок металлов и сплавов

Установлено, что ИПД заготовок методами угловой гидроэкструзии (РКУГ либо РКМУГ) обеспечивает эффективную трансформацию структуры и свойств металлов и сплавов. В качестве примера приведены результаты

обработки методом РКУГ образцов меди М1 с размерами зерен в исходном состоянии 6–40 μm (средний размер 16 μm) [3]. После трех проходов заготовки через S-образную матрицу (см. рис. 1) размеры зерен не превышали 1 μm , а размеры большинства равнялись 200–600 nm, причем более крупные из них были также фрагментированы со средним размером фрагментов порядка 100–200 nm (рис. 5).

На рис. 6 приведены результаты испытания на сжатие медных образцов, предварительно деформированных методом РКУГ. Как и в случае предварительной деформации заготовок методом РКУЭ, увеличение степени накопленной деформации свыше $\epsilon = 2.3$ практически не влияет на уровень предела текучести меди. Твердость меди после 6 проходов через матрицу с $\Phi = 90^\circ$ ($\epsilon = 6.8$) повысилась до 1340 МПа.

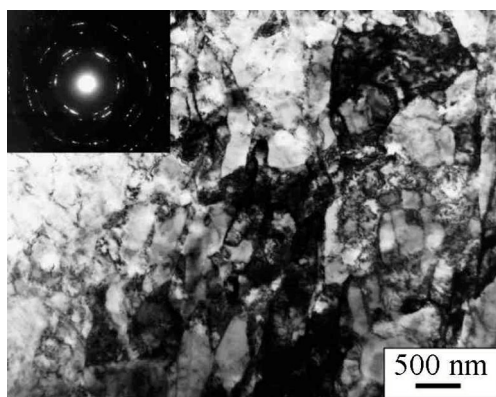


Рис. 5. Микроструктура меди после трех операций РКУГ в S-образной матрице

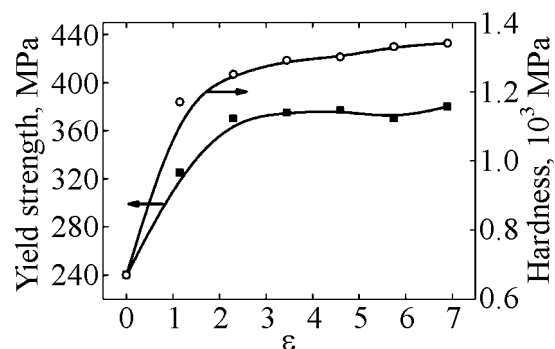


Рис. 6. Влияние РКУГ на свойства меди М1

Полученные на образцах меди, алюминия и их сплавов результаты свидетельствуют, что с точки зрения достигаемых эффектов структурной модификации и повышения комплекса свойств обрабатываемых материалов метод РКУГ ни в чем не уступает методу РКУЭ [3,15].

Особенно эффективные результаты достигнуты при комбинированном использовании методов РКУГ и прямой гидроэрозии (ПГ). Так, в результате РКУГ и ПГ образцов сплава Al–0.6Sc–0.6Ta зерно измельчилось до 200–400 nm (наблюдались фрагменты 20–50 nm), получен аномально сверхпересыщенный твердый раствор Sc и Ta в Al. Обработка сплава АД31, включающая предварительную закалку, старение и комбинированную деформационную обработку методами ПГ и РКУГ, обеспечила формирование более однородной структуры с размерами зерен до 200–500 nm и повышение прочности на 35–40%.

Предложен принципиально новый подход к комбинированному использованию методов ПГ и РКУГ: впервые продемонстрировано, что многократное поочередное их применение в технологической цепочке обработки меди в дробном режиме при оптимальных степенях деформации результирова-

лось в формировании уникального комплекса физических и механических свойств [15,16]. В проволоке диаметром 0.5 mm из бескислородной меди Cu-OF были достигнуты высокий предел прочности $\sigma_b = 576$ МПа, относительное удлинение $\delta = 1.9\%$ и электрическая проводимость на уровне 96.7% IACS. В проволоке из Cu-FRTP достигнуты $\sigma_b = 686$ МПа, $\delta = 2.0\%$ и электрическая проводимость на уровне 86.4% IACS. Такой комплекс прочности и электрической проводимости является рекордным для меди и медных сплавов (рис. 7).

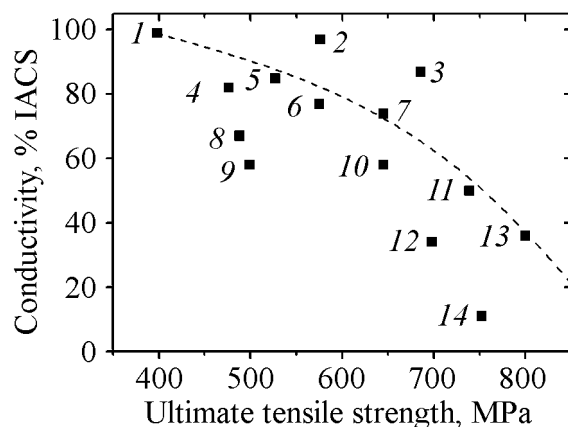


Рис. 7. Физические и механические свойства меди и медных сплавов после холодной деформации: 1, 2 – Cu-OF; 3 – Cu-FRTP; 4 – Cu-0.1Mg; 5 – Cu-0.28Co; 6 – Cu-0.3Cr-0.15Ti; 7 – Cu-0.3Cr-0.25Sn-0.2Zn; 8 – Cu-2.4Fe-0.12Zn; 9 – Cu-1.0Cr-0.25Sn-0.2Zn; 10 – Cu-2.0Ni-0.4Si-0.2Zn; 11 – Cu-0.8Co-1.5Fe-0.6Sn; 12 – Cu-1.5Ni-2.0Sn-0.5Zn-0.25Ti; 13 – Cu-3.2Ni-1.2Sn-0.7Si-0.3Zn; 14 – Cu-9.0Ni-2.0Sn

Предложенный метод комбинированной обработки эффективен благодаря альтернативным схемам деформации и периодическому созданию благоприятных условий для процессов релаксации и динамической рекристаллизации в материале. При ИПД простым сдвигом измельчение зерен и упрочнение материала достигают насыщения. Но при продолжающейся обработке заготовок метод ПГ обеспечивает более высокую степень упрочнения материала, а РКУГ – условия для релаксации напряжений, залечивания микротрещин и меньшего истощения ресурса пластичности.

Использование методов ПГ и РКУГ при обработке низколегированного дисперсионно-твердеющего медного сплава Cu-Cr-Zr позволило получить образцы с уровнем прочности $\sigma_b = 693$ МПа, превосходящим известные результаты, высокой термостойкостью и электропроводностью на уровне 82% IACS.

Определены условия получения методами ИПД высокого комплекса механических свойств титановой проволоки микронных размеров с НК-структурой. В проволоке диаметром 0.28 mm из титана BT1-0 обеспечиваются механические свойства в диапазоне от предела прочности $\sigma_b = 607$ МПа при относительном удлинении $\delta = 15\%$ до $\sigma_b = 1313$ МПа при $\delta = 3\%$.

В случае использования метода РКМУГ крайне важна (с точки зрения характера структурообразования) возможность обеспечить в процессе обработки материала желаемый маршрут деформирования путем подбора углов и расположения деформирующих шайб [11,12]. Изменение пространственного положения плоскости сдвига материала, как уже отмечалось, можно осуществить путем поворота на требуемый угол пары втулок, образующих соответствующую зону деформации. Это способствует эффективному дроблению структурных составляющих и изотропизации структуры металлических материалов.

Установлено, что методы РКМУЭ и РКМУГ с углами $\Phi = 110\text{--}160^\circ$ могут успешно использоваться для производства би- и полиметаллических заготовок с формированием субмикроструктуры во всех компонентах (при $\Phi = 90^\circ$ такие заготовки обрабатывать невозможно) [12]. Так, составные заготовки из сплава NbTi в медной оболочке продавливали через канал с тремя зонами сдвига и различными степенями накопленной за проход деформации ($\varepsilon = 0.62\text{--}1.27$). При меньших степенях деформации ($\varepsilon = 0.62\text{--}0.82$) за проход наблюдались сравнительно равномерная деформация элементов составной заготовки и умеренная (~ 800 МПа) величина давления деформирования. Экспериментально доказана возможность многократного деформирования по схеме «заготовка за заготовкой» без каких-либо промежуточных обработок между циклами. Реализовано соответственно 15 и 12 циклов продавливания. Равноосная СМК-структура формировалась после многократного деформирования как в центральном элементе, так и в трубчатой оболочке. При величине деформации за проход $\varepsilon = 1.27$ (в случае использования меньших углов Φ) наблюдалось неравномерное истечение компонент заготовки с опережением сердечника, давление экструзии превышало 1000 МПа.

Методом РКМУЭ обрабатывали заготовку, состоящую из пакета ($d \sim 12$ mm) проволочных элементов, заключенного в общую медную оболочку с наружным диаметром 15 mm. Каждый проволочный элемент представлял собой сердечник из сплава NbTi, покрытый слоем меди М0б. Составную заготовку продавливали через канал с тремя зонами сдвига при величине накопленной за проход деформации $\varepsilon < 1$. Предлагаемый способ и режимы обеспечивали многократное продавливание труднодеформируемого композита с формированием СМК-структуры во всех составных элементах.

Полученные результаты исследования имеют большое практическое значение. К примеру, включение РКМУЭ в технологическую цепочку изготовления сверхпроводящей проволоки из сплава NbTi в медной оболочке (горячее прессование биметалла + РКМУЭ + гидроэкструзия + волочение) обеспечило формирование высокооднородной нанокристаллической структуры с рассеянной текстурой и высокой плотностью границ зерен [17,18]. В результате достигается упрочнение материала и значительное (до двух раз) повышение плотности критического тока, причем плотность выше практически во всем исследованном диапазоне магнитных полей.

Уникальные возможности в производстве наноматериалов представляет процесс пакетной гидроэкструзии. Следует отметить не только возможности достижения уникальных результатов в формировании наноструктурного состояния и особого комплекса свойств таких материалов, но и технологичность метода. Установлено, например, что метод пакетной гидроэкструзии может быть успешно использован для получения ферромагнитных композитов с относительно регулярной структурой магнитной компоненты. Многократное применение пакетной гидроэкструзии и волочения позволило получить образцы композитов, в которых расчетный диаметр волокон армкожелеза варьировался в широких пределах, достигая области наноразмерных значений. Впервые получены образцы Cu–Fe-композитов с однодоменной структурой магнитной подсистемы и, как следствие, максимальной величиной коэрцитивной силы. Показано, что метод пакетной гидроэкструзии может быть использован для получения высокопрочных волокнистых магнитных микро- и нанокомпозитов, обладающих низким удельным электрическим сопротивлением и высокой коэрцитивной силой [19].

Заключение

В результате выполненных в ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины комплексных фундаментальных и прикладных исследований процессов гидроэкструзии выявлены новые возможности получения металлических наноматериалов с уникальными физическими и механическими свойствами, разработаны научные основы новых технологий производства объемных заготовок таких материалов.

Эти технологии основаны на использовании вновь разработанных методов интенсивной пластической деформации – угловой гидроэкструзии, равноканальной многоугловой экструзии и многоугловой гидроэкструзии, развитии методов прямой гидроэкструзии, в частности пакетной гидроэкструзии, применении гидроэкструзии в комбинации с традиционными методами обработки металлов давлением.

Результатом теоретических разработок являются выявленные закономерности процессов, расчетные соотношения для определения их параметров, возможность установления рациональных условий реализации угловой экструзии и угловой гидроэкструзии заготовок на основе учета комплексного влияния основных факторов процессов (геометрических, условий трения, измельчения зерен, упрочнения материала и т.п.), возможность производства длинномерных прутков и проволоки из металлов, сплавов, би- и полиметаллических композитов с уникальным комплексом физических и механических свойств.

Разработанные новые устройства для угловой гидроэкструзии, равноканальной многоугловой экструзии обеспечивают высокоэффективное производство изделий из субмикро- и нанокристаллических материалов.

1. *V.A. Beloshenko, V.H. Varyukhin, V.Z. Spuskanyuk*, Теория и практика гидроэкструзии, Наукова думка, Киев (2007).
2. *V.Z. Spuskanyuk, O.A. Davydenko, I.M. Kovalenko*, in: Proc. of Intern. Conf. on «Modern Materials Science: Achievements and Problems», MMS-2005, Kiev, Ukraine (2005), p. 224.
3. *V. Spuskanyuk, A. Spuskanyuk, V. Varyukhin*, J. Mater. Proc. Tech. **203**, 305 (2008).
4. *V.M. Segal*, Mater. Sci. Eng. **A386**, 269 (2004).
5. *V.Z. Spuskanyuk, A.H. Gangalo, A.A. Davydenko, I.M. Kovalenko*, в сб.: Обработка материалов давлением, ДДМА, Краматорск (2009), № 1, с. 50.
6. *V.Z. Spuskanyuk, A.H. Gangalo, A.A. Davydenko*, ФТВД **19**, № 4, 82 (2009).
7. *V.Z. Spuskanyuk, A.H. Gangalo, A.A. Davydenko*, ФТВД **20**, № 4, 133 (2010).
8. *V.Z. Spuskanyuk, O.A. Davydenko, O.N. Gangalo*, High Pressure Research **32**, 544 (2012).
9. Пат. № UA 46169 МПК (2009) B21 C 37/00, B21 C 37/15/№ u 2006 06382, В.М. Варюхин, В.З. Спусканюк, О.М. Гангало, О.А. Давиденко, І.М. Коваленко, Заявл. 19.06.2009, Бюл. № 23 (2009).
10. *V. Beloshenko, V. Spuskanyuk*, Inter. J. Mater. Chem. **2**, 145 (2012).
11. *V.H. Varyukhin, V.Z. Spuskanyuk, N.I. Matrosov, A.B. Dugadko, B.A. Shevchenko, Э.А. Медведская, Л.Ф. Сенникова, А.В. Спусканюк, Е.А. Павловская*, ФТВД **2**, № 4, 31 (2002).
12. *V.Z. Spuskanyuk, A.B. Dugadko, I.M. Kovalenko, N.I. Matrosov, A.V. Spuskanyuk, B.A. Shevchenko*, ФТВД **13**, № 3, 85 (2003).
13. *K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon*, Acta Mater. **46**, 1589 (1998).
14. *K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon*, Mater. Sci. Eng. **A281**, 82 (2000).
15. *V. Spuskanyuk, O. Davydenko, A. Berezina, O. Gangalo, L. Sennikova, M. Tikhonovsky, D. Spiridonov*, J. Mater. Proc. Tech. **210**, 1709 (2010).
16. *O. Davydenko, V. Spuskanyuk, V. Varyukhin*, Mater. Sci. Forum **667–669**, 909 (2011).
17. *V.A. Beloshenko, T.E. Konstantinova, N.I. Matrosov, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Chishko, D. Gajda, A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, R. Puźniak, H. Szymczak*, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism **22**, 505 (2009).
18. *V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V.B. Chishko, V.Z. Spuskanyuk, E.A. Павловская, Л.Ф. Сенникова, Э.А. Медведская, О.Н. Миронова, Д. Гайда, А. Залески, Р. Пужняк*, Металлы № 5, 63 (2009).
19. *A.H. Черкасов, В.А. Белошенко, В.З. Спусканюк, В.Ю. Дмитренко, Б.А. Шевченко*, ФММ **104**, 144 (2007).

V.Z. Spuskanyuk

NEW ACHIEVEMENTS OF DEVELOPMENT OF HYDROEXTRUSION THEORY AND METHODS

New possibilities of the creation of metal nanomaterials with unique physical and mechanical properties were discovered as results of integrated fundamental and applied studies of hydroextrusion. The results of the study of new severe plastic deformation

(SPD) processes, i.e. equal-channel angular hydroextrusion (ECAH), equal-channel multiple-angular extrusion and hydroextrusion (ECMAE, ECMAH) were presented. The effects in the course of formation of the structure and the properties of Cu and Cu alloys, Al alloys, Ti have been considered. Techniques and facilities for high-production of bulk materials with submicrocrystalline and nanocrystalline grain structure, in particular of multiple-meter long billets, are briefly described.

Keywords: hydroextrusion, method, facility, severe plastic deformation, submicrocrystalline and nanocrystalline materials

Fig. 1. Scheme of the ECAH facilities with (a) one and (b) two deformation zones

Fig. 2. Scheme of the ECAH facility with connected vertical and horizontal containers

Fig. 3. Facility of hydro mechanical angular extrusion of the rods of unlimited length: 1 – rod, 2 – outer gripping device, 3 and 4 – automatic hydraulic cylinders, 5 – iron ring, 6 – interior gripping device, 7 – screw, 8 and 12 – seals, 9 – high pressure container, 10 – high pressure fluid, 11 – pressing device, 13 – angular die, 14 – device of the initial rod charging

Fig. 4. Scheme of the ECMAH facility

Fig. 5. Microstructure of Cu after three ECAH passes through the S-type die

Fig. 6. Effect ECAH on the properties of commercial copper

Fig. 7. Physical and mechanical properties of Cu and Cu alloys after cold deformation: 1, 2 – Cu-OF; 3 – Cu-FRTP; 4 – Cu-0.1Mg; 5 – Cu-0.28Co; 6 – Cu-0.3Cr-0.15Ti; 7 – Cu-0.3Cr-0.25Sn-0.2Zn; 8 – Cu-2.4Fe-0.12Zn; 9 – Cu-1.0Cr-0.25Sn-0.2Zn; 10 – Cu-2.0Ni-0.4Si-0.2Zn; 11 – Cu-0.8Co-1.5Fe-0.6Sn; 12 – Cu-1.5Ni-2.0Sn-0.5Zn-0.25Ti; 13 – Cu-3.2Ni-1.2Sn-0.7Si-0.3Zn; 14 – Cu-9.0Ni-2.0Sn