

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

В.З. Спусканюк, А.Б. Дугадко, И.М. Коваленко,
Н.И. Матросов, А.В. Спусканюк, Б.А. Шевченко

ОСОБЕННОСТИ РАВНОКАНАЛЬНОЙ МНОГОУГЛОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

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

Статья поступила в редакцию 20 июня 2003 года

Проанализированы различные схемы равноканальной многоугловой экструзии (РКМУЭ) и проиллюстрированы некоторые ее особенности и возможности. Предложена математическая модель процесса для оценки силового режима. Проведена оценка контактного трения при использовании жидкости высокого давления.

Введение

В последние годы большой интерес вызвали процессы обработки металлов давлением, которые позволяют формировать субмикроструктурную (СМК) структуру в изделиях, форма и размеры которых мало отличаются от таковых в исходных заготовках. Основной целью обработки заготовок при реализации таких процессов есть накопление деформаций, приводящих к желаемым изменениям структуры и свойств материала. Одним из наиболее эффективных в этом отношении способов обработки заготовок является равноканальная угловая экструзия (РКУЭ), осуществляемая с высокой интенсивностью деформации сдвига $\Delta\Gamma$ (максимальное значение $\Delta\Gamma = 2$). Авторами этой разработки сформулированы требования к структурообразованию при пластической деформации, исследована механика процессов РКУЭ, установлена возможность достижения аномально высоких прочностных и пластических свойств металлов при их деформационном упрочнении простым сдвигом [1]. Результаты исследования закономерностей процессов РКУЭ и так называемой S-образной экструзии, при которой в канале имеется две зоны пластического сдвига заготовки, приведены в [2–5]. Нами предложен способ РКМУЭ [6], главной особенностью которого является наличие в канале нескольких очагов (зон) сдвиговой деформации, и устройство для его реализации [7]. Способ обеспечивает высокопроизводительную реализацию дробного режима интенсивного деформирования, создание СМК-структуры металла после многоциклового РКМУЭ заготовок [8,9].

Целесообразность использования способа и устройств многоугловой экс-

трузии может быть обусловлена рядом причин.

Для достижения более эффективных результатов структурообразования целесообразно повышать интенсивность разовых деформаций. Однако увеличение последних ограничивает возможности практической обработки высокопрочных материалов в связи со значительным уровнем давления экструзии, а малопластичных материалов – ввиду вероятного разрушения заготовок. Кроме того, отрицательное влияние на ряд металлов оказывает разогрев заготовок вследствие большого выделения тепла при высоких интенсивностях деформаций. Так, рекристаллизация сильнодеформированной технической меди начинается при 200–230°C, а динамическое разупрочнение меди, обработанной методами интенсивной пластической деформации (ИПД), – при температуре около 180°C [8,10]. Поэтому целесообразным может быть ограничение разовой интенсивности деформации сдвига ($\Delta\Gamma < 2$), тем более, что для формирования в образцах более однородной структуры металла с более мелким зерном все равно приходится осуществлять многоцикловую экструзию заготовок.

Спорным может быть вопрос о том, нужно ли несколько очагов сдвига размещать в одном канале. Целесообразность такого решения, на наш взгляд, может быть связана с повышением производительности многоциклового экструзии заготовок при заведомо регламентированном наборе разовых интенсивностей деформаций в зонах сдвига, нарастающих либо убывающих по величине по ходу продвижения заготовки через канал. Достоинством такого решения является также возможность программировать изменение направления сдвига металла в очередной зоне, не полагаясь на аккуратность прессовщика в соблюдении необходимых разворотов заготовки при многоциклового экструзии в устройствах с одной зоной ИПД.

Существенный недостаток подобных решений – увеличение поверхности контактного трения заготовок с инструментом. В связи с этим в данной статье рассматриваются силовой режим процесса РКМУЭ и возможности равноканальной многоугловой гидроэкструзии (РКМУГ).

Схемы равноканальной многоугловой экструзии

Обработка заготовок упрощается, когда входной и выходной участки канала расположены вертикально, причем не обязательно соосно (рис. 1). При этом возможно использование известных устройств для загрузки заготовок в контейнер, заливки рабочей жидкости при реализации процесса в режиме гидроэкструзии, создания противодавления на выходе из канала. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть три основные схемы устройств.

В случае *S*-образной экструзии (рис. 1,а) имеется две зоны интенсивной пластической деформации с промежуточным участком между ними. При

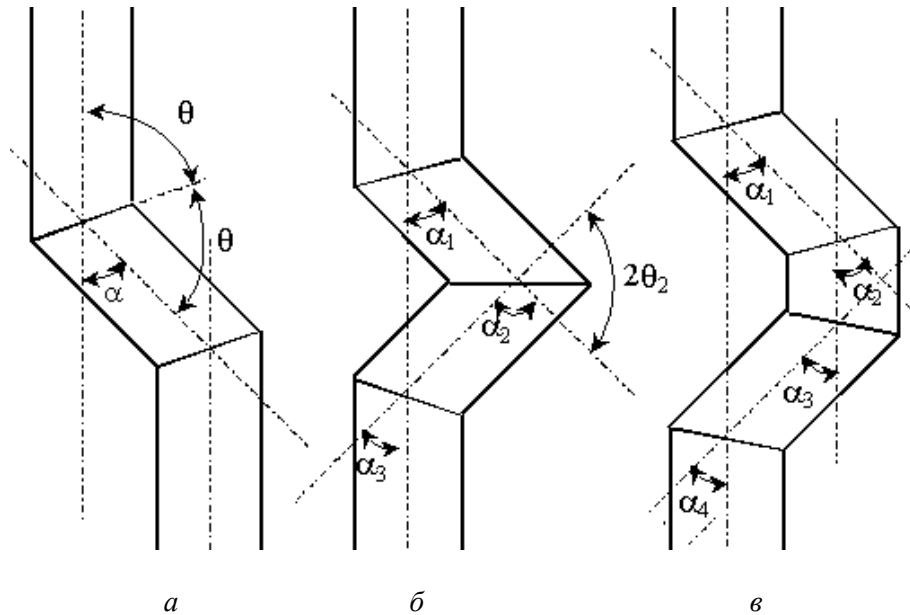


Рис. 1. Схемы РКМУЭ: а – S-образная; б – 3-угловая; в – 4-угловая

этом углы α пересечения входного и выходного участков с промежуточным (углы изменения направления течения заготовки) обычно одинаковы и принимаются не более 60° [2–5]. Согласно [1] при отсутствии контактного трения интенсивность деформаций сдвига в каждой зоне $\Delta\Gamma = 2\text{ctg}\theta$, где $\theta = 0.5(\pi - \alpha)$.

По другой схеме (рис. 1,б) входной и выходной участки канала вертикальны и соосны, между ними расположены два наклонных участка, которые пересекаются с вертикальными участками под углами α_1 и α_3 , а угол $\alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_3$. В этом случае сумма $\alpha_1 + \alpha_3$ не должна превышать 90° для обеспечения течения металла по каналу. При $\alpha_1 = \alpha_3 = 45^\circ$ получается $\alpha_2 = 90^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $\Delta\Gamma_2 = 2$.

По третьей схеме экструзии (рис. 1,в) $\alpha_1 = \alpha_2$, $\alpha_3 = \alpha_4$, причем снимаются указанные выше ограничения на величину суммы углов пересечения заходного и выходного участков с наклонными, возможно $\alpha_1 + \alpha_4 > 90^\circ$, т.е. меньше ограничений при назначении интенсивности сдвига в зонах ИПД. Некоторое различие имеется также в изменениях направления течения заготовки по каналу. По первым двум схемам (рис. 1,а и б) поток металла изменяет направление течения в очередной зоне сдвига в другую сторону, по третьей схеме (рис. 1,в) направление течения во второй и третьей зонах меняется по часовой стрелке.

В разработанном устройстве [7] достаточно просто, путем увеличения количества деформирующих втулок, можно продолжить канал с увеличением числа зон сдвиговой деформации, а их пространственное положение изменять, поворачивая втулки относительно вертикальной оси.

Деформированное состояние

Для выбора схемы и рациональных режимов РКМУЭ, обеспечивающих эффективное формирование СМК-структуры, необходимо изучение деформированного состояния заготовок. Используемые аналитические оценки основаны на предположении о равномерном распределении деформаций по сечению основной части заготовки (на переднем и заднем концах распределение деформаций заведомо неравномерно). В [4,5] приведены результаты исследования методом конечных элементов (МКЭ) распределения деформаций по поперечному сечению образцов после прохода через одноугловую матрицу без учета сил трения. Показано, что распределение деформаций по сечению неравномерно, существенное влияние на уровень и неравномерность распределения деформаций оказывают условия экструзии образцов, а МКЭ позволяет получить более точные оценки.

В отличие от известных данных нами проведены исследования МКЭ деформированного состояния заготовок после РКМУЭ в матрицах различной конструкции и с учетом сил трения. В качестве примера приведено (рис. 2) распределение эквивалентной деформации ε по сечению медных заготовок, РКМУЭ которых выполнена по 3-угловой схеме (см. рис. 1,б). При моделировании процесса приняты следующие параметры: диаметр канала 15 mm, $\alpha_1 = \alpha_3 = 30^\circ$, коэффициент трения $f = 0.15$, причем длинная заготовка одновременно деформируется в трех зонах сдвига.

Результаты моделирования свидетельствуют о неравномерном распределении деформаций по поперечному сечению заготовки, а наименьшую деформацию претерпевают слои материала в осевой ее части. Для удобства сопоставления результатов на рис. 3 приведена зависимость эффективной деформации ε от хода заготовки в канале матрицы только для трех слоев – осевого и крайних боковых. Видно, что при прохождении зон сдвига большую деформацию претерпевают слои, которые в этих зонах являются внутренними: слои правой поверхности – в первой зоне, левой поверхности – во второй. В третьей зоне накопленные деформации в поверхностных слоях практически выравниваются.

Создание в последующих зонах сдвига жидкостного противодействия или подпора за счет деформации способствует лучшему затеканию материала в углы канала, что в конечном итоге влияет на характер распределения деформаций по поперечному сечению заготовки и на абсолютную величину накопленной деформации.

Характер структурообразования при многоугловой экструзии

Характерной особенностью РКМУЭ является то, что в одном цикле экструзии (продавливания через канал) при относительно малых углах пересечения каналов (а следовательно, малых интенсивностях деформаций в каждой зоне) суммарная величина деформации за цикл сопоставима и может даже превосходить таковую для одноугловой экструзии. Одновременно с этим реализация любой из рассмотренных схем РКМУЭ сопровождается изменением направления сдвига в очередной зоне, в том числе на противоположное. Другими словами, если рассмотреть геометрию искажения в результате про-

стого сдвига представительной квадратной ячейки, то она может попеременно трансформироваться по схеме: квадрат–параллелограмм–квадрат или квадрат–параллелограмм–параллелограмм–квадрат, а вписанная в квадрат окружность – по схеме: окружность–эллипс–окружность или окружность–эллипс–эллипс–окружность [11].

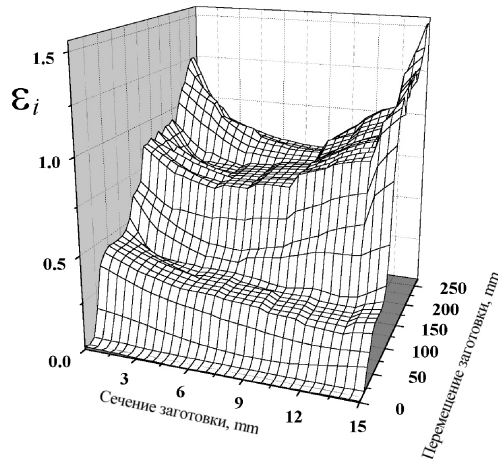


Рис. 2. Распределение эквивалентной деформации по сечению заготовки на разных стадиях 3-угловой экструзии

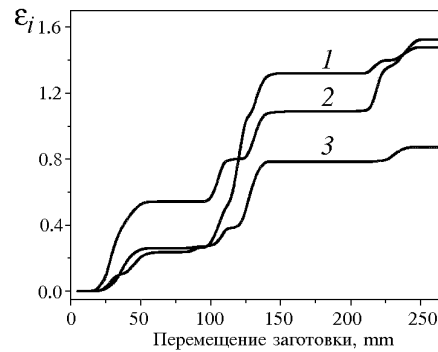


Рис. 3. Изменение эквивалентной деформации в зависимости от перемещения заготовки в характерных точках поперечного сечения: 1, 2 – на боковых поверхностях, 3 – на оси

С точки зрения характера структурообразования это крайне важно, поскольку означает не что иное, как изменение знака деформации, т.е. попеременное растяжение и сжатие материала вдоль двух взаимно перпендикулярных главных осей. Отметим, что в каждой зоне эти оси претерпевают поворот на угол, зависящий от интенсивности деформаций, а при прохождении материала через каждую последующую зону (схемы 1,а и б) направление поворота осей меняется на противоположное. Это способствует эффективному дроблению структурных составляющих и изотропизации структуры в каждом цикле деформирования, сохраняя при необходимости коэффициент формы (равноосные зерна, к примеру, деформируясь, могут остаться равноосными). Изменение пространственного положения плоскости сдвига материала, как уже отмечалось, можно осуществить в одном цикле автоматически путем поворота на требуемый угол пары втулок, образующих соответствующую зону деформации.

В одноугловой схеме такого эффекта можно достичь лишь за счет соответствующего поворота заготовки между двумя циклами деформирования. При этом необходимо строго фиксировать положение плоскости сдвига по отношению к направлению течения заготовки, а, осуществляя поворот, четко контролировать угол, что в случае, например, цилиндрической формы сделать затруднительно.

**Силовой режим процессов равноканальной
многоугловой экструзии и гидрокструзии**

В [1] показано, что при реализации РКУЭ заготовок с обычно используемыми значениями $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0.5 \leq \Delta\Gamma \leq 2$ среднее давление сдвиговой деформации в 2–3 раза меньше, чем при реализации эквивалентного процесса прямого прессования. Еще большее различие может быть достигнуто при дробном режиме деформирования с углами $\theta > 60^\circ$. Однако эти теоретические оценки сделаны для «идеальных» процессов, т.е. без учета сил трения. Во многих известных публикациях отмечается, что силы трения оказывают определяющее влияние на давление РКУЭ. Естественно, что учет сил трения и решение проблемы снижения потерь на трение становятся особенно актуальными для процесса РКМУЭ, при реализации которого поверхность контакта заготовки с инструментом может многократно увеличиваться.

В данной работе оценка силового режима процесса холодной РКМУЭ проведена с учетом влияния контактного трения. Поскольку в области $\theta = 60-80^\circ$ интенсивность деформации сдвига различается при значениях коэффициентов трения $f = 0$ и $f = 1$ не более чем на 10%, для упрощения математических выкладок принято, что во всех случаях $\Delta\Gamma = 2\text{ctg}\theta$.

Согласно [1] составляющая силы экструзии, необходимая для осуществления сдвиговой деформации (без учета сил трения) в одной зоне:

$$R = FK\Delta\Gamma,$$

где F – площадь поперечного сечения канала.

С учетом упрочнения материала составляющая, необходимая для осуществления сдвига материала в одной i -й зоне деформации, может быть оценена в виде

$$R_i = FK_{iz}\Delta\Gamma_i,$$

где $\Delta\Gamma_i$ – интенсивность деформаций сдвига в i -й зоне, K_{iz} – расчетное значение напряжения пластического сдвига в i -й зоне. Величина K_{iz} принимается равной среднегеометрическому значению напряжений сдвига металла до и после деформации в этой зоне, т.е.

$$K_{iz} = \sqrt{(K_{i-1})K_i},$$

где K_i – напряжение пластического сдвига металла после деформации в i -й зоне. Тогда составляющая силы экструзии, необходимая для осуществления сдвига металла в n зонах:

$$R_n = F \sum_{i=1}^n K_{iz}\Delta\Gamma_i = 2F \sum_{i=1}^n K_{iz} \text{ctg}\theta_i.$$

Более точный учет влияния упрочнения металла на силу экструзии может быть сделан, если произвести интегральную оценку влияния деформации, представив кривую предела текучести в виде какой-либо функции, например $\sigma_s = \sigma_0 + C\Gamma^B$.

Составляющая силы экструзии, необходимая для преодоления сил контактного трения по стенкам канала:

$$T = \Pi \sum_{i=0}^n f_i K_i l_i,$$

где Π – периметр поперечного сечения канала; f_i , l_i – соответственно коэффициент трения и длина заготовки на участке канала после i -й зоны сдвига.

Тогда сила экструзии (без противодействия) может быть оценена в виде

$$Q = 2F \sum_{i=1}^n K_{iz} \operatorname{ctg} \theta_i + \Pi \sum_{i=0}^n f_i K_i l_i,$$

а давление

$$P = 2 \sum_{i=1}^n K_{iz} \operatorname{ctg} \theta_i + \frac{\Pi}{F} \sum_{i=0}^n f_i K_i l_i.$$

Считая форму участков канала между зонами сдвига цилиндрической с диаметром D и приняв для упрощения, что коэффициент трения на всех участках одинаковый, получим

$$P = 2 \sum_{i=1}^n K_{iz} \operatorname{ctg} \theta_i + \frac{4f}{D} \sum_{i=0}^n K_i l_i.$$

Проведены оценки коэффициента трения металла о стенки канала путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений давления экструзии. При этом с целью снижения сил контактного трения деформация заготовок осуществлена методом равноканальной гидроэкструзии.

В экспериментах использован канал S -образной конфигурации (см. рис. 1,а) с диаметром цилиндрических участков, равным 18 мм. Исходные заготовки диаметром 19 мм, длиной 30 и 45 мм устанавливали в коническую матрицу, расположенную в камере перед входным участком S -образного канала, в камеру заливали рабочую жидкость и осуществляли ее сжатие подвижным плунжером. После прямой гидроэкструзии через матрицу диаметром 18 мм заготовки продавливали жидкостью высокого давления через весь канал с двумя зонами сдвига при $\theta = 60^\circ$ в каждой зоне. Эксперименты выполнены на образцах из меди М1 (99.9% Cu), на поверхность исходных заготовок предварительно наносили смазочное вещество (на основе технического воска с добавками касторового масла и канифоли), в качестве рабочей жидкости использовали индустриальное масло марки И20, скорость деформирования составляла 1 мм/с. В расчетах использована экспериментально установленная кривая предела текучести меди.

Давление, затрачиваемое на прямую гидроэкструзию заготовок с диаметра 19 мм на 18 мм, оценивали в виде [12]:

$$P_r = \sigma \left[\left(1 + 0.289f \operatorname{ctg} \frac{\alpha_r}{2} \right) \ln R + 1.56 \operatorname{tg} \frac{\alpha_r}{2} \right],$$

где σ – среднегеометрическое значение предела текучести меди в исходном состоянии и после гидроэкструзии, α_r – угол конусности матрицы для гидроэкструзии, равный 20° .

Давление жидкости при равноканальной гидроэкструзии изменялось в зависимости от стадии процесса, т.е. положения деформируемой заготовки в канале устройства. Давление на плунжере, сжимающем жидкость, равно $P_{\max} = P_r + P$, если заготовка одновременно деформируется в уплотняющей матрице диаметром 18 mm и n зонах сдвига.

Условия и результаты исследования осредненных значений коэффициентов трения при РКМУГ представлены в табл. 1. Накопленная степень деформации сдвига заготовки (с учетом деформации в матрице диаметром 18 mm) обозначена Γ_s .

Таблица 1

Условия экспериментов и результаты расчетов

L , mm	n	Γ_s	P_{\max} , МПа	f	T , %
30	1	1.37	325–350	0.05–0.07	20–25
30	2	2.53	510–560	0.07–0.10	16–24
45	2	2.53	695–765	0.14–0.17	38–44

Результаты исследования свидетельствуют об эффективности использования жидкости высокого давления для реализации РКМУЭ, 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 только от размеров заготовки, а относительная длина канала не оказывает существенного влияния на давление экструзии. Уровень давления определяется числом зон сдвига, в которых заготовка деформируется одновременно, интенсивностью деформаций сдвига и относительной длиной заготовки, определяющей размеры контактной поверхности.

С увеличением длины заготовок наблюдается некоторое повышение расчетного значения коэффициента 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 коэффициента трения $f = 0.05–0.17$ при равноканальной гидроэкструзии существенно меньше уровня $f = 0.25–0.50$, который соответствует по той же расчетной методике давлению механической равноканальной экструзии заготовок длиной 30–45 mm при наличии одной или двух зон с разовой интенсивностью деформаций сдвига $\Delta\Gamma = 0.35–1.16$ [8].

Некоторые возможности метода

Прессование сплошных заготовок. Заготовки из меди М1 в виде прутков диаметром $D = 15$ mm и высотой $H = 50$ mm отжигали при температуре 550°C в течение одного часа и подвергали многоцикловой РКМУЭ с тремя зонами деформации (через четыре пересекающихся участка канала при значениях θ_1

$= \theta_3 = 80^\circ$ и $\theta_2 = 70^\circ$) с накопленной за цикл степенью деформации $\varepsilon = 0.82$.

Величину суммарно накопленной деформации за N циклов ε_s , эквивалентную однородной деформации, определяли как

$$\varepsilon_s = N \frac{2}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^{n-1} \operatorname{ctg} \theta_i,$$

где N – количество технологических циклов экструзии; θ_i – расчетный угол в i -й зоне сдвига.

Данные о характере структуры в зависимости от числа циклов и величины накопленной деформации приведены в табл. 2. В ней использованы результаты оптических и электронно-микроскопических исследований о характере и типе микроструктуры, соотношении максимального и минимального размеров зерен L_{\max}/L_{\min} , среднем размере зерна L_{avg} и среднем коэффициенте его формы k_{avg} , определяемом как отношение продольного и поперечного размеров. Из таблицы следует, что при $\varepsilon = 0.82$ достаточная для формирования близкой к равноосной СМК-структуры величина накопленной деформации ε_s должна быть более 5.

Деформирование составных заготовок. Составные заготовки диаметром $D = 15$ mm образованы сборкой центрального элемента из алюминия АД0 и трубчатой оболочки из меди М1. Условия деформирования: схема с 4 деформирующими участками канала; величины деформации за цикл последовательно составляют: $\varepsilon_1 = 0.62$, $\varepsilon_2 = 0.82$, $\varepsilon_3 = 1.27$. После деформирования с накопленной за цикл деформации $\varepsilon < 1$ получали изделия, качество которых свидетельствовало о равномерном характере истечения составных элементов заготовки. Предлагаемый режим позволял осуществить деформирование по схеме «заготовка за заготовкой» без каких-либо промежуточных обработок между циклами. При этом равноосная СМК-структура формировалась после многоциклового экструзии как в центральном элементе, так и в трубчатой оболочке. Из такой заготовки путем удаления центрального элемента (сердечника), например, сверлением можно получать изделия в виде труб с достаточно правильной геометрией сечения.

Таблица 2

Характер структуры меди в зависимости от числа циклов и величины накопленной деформации

Число циклов	ε_s	Структура	Субструктура	L_{\max}/L_{\min} , μm	L_{avg} , μm	k_{avg}
Исходное состояние	–	Крупнозернистая, близкая к равноосной	Гомогенная	40/6	15.8	1.7
1	0.82	Крупнозернистая, неравноосная	Блочно-ячеистая	20/1	5.0	3.5

4	3.28	Среднезернистая, неравноосная	Ячеистая	10/1	2.74	3.2
6	4.92	Мелкозернистая, близкая к равноосной	Мелкоячеистая	3/0.5	1.2	2.2
23	18.9	СМК, равноосная	Фрагментированная мелкоячеистая с большеугловыми границами	1/0.5	0.8	1.4

При режиме экструзии с накопленной за цикл деформацией $\varepsilon > 1$ наблюдалось неравномерное истечение с опережением центрального элемента (сердечника), что указывало на необходимость увеличения прочности связи между компонентами, а силовые режимы деформирования были более высокими.

Аналогичным образом обрабатывали составные заготовки диаметром $D = 15$ mm и высотой $H = 50$ mm, образованные из ниобий-титанового сплава НТ50 (сердечника диаметром $d = 12$ mm) и трубчатой оболочки из меди М1. Экструзию осуществляли с числом зон сдвига $n = 3$ и различными степенями деформации за цикл ($\varepsilon_1 = 0.62$, $\varepsilon_2 = 0.82$ и $\varepsilon_3 = 1.27$). Результаты: при более дробных режимах деформирования ($\varepsilon_1 = 0.62-0.82$) наблюдали сравнительно равномерную деформацию элементов составной заготовки, умеренную величину давления экструзии (~ 800 МПа). Реализовано соответственно 15 и 12 циклов продавливания. При величине деформации за цикл $\varepsilon_3 = 1.27$ наблюдали неравномерное истечение составных элементов, давление экструзии превышало 1000 МПа.

Обработка волокнистых композитов. Метод РКМУЭ дает возможность деформировать и композиты. Например, обработке подвергали заготовку ($H = 50$ mm), состоящую из пакета ($d = 12$ mm) проволочных элементов, заключенного в общую наружную медную (М1) оболочку ($D = 15$ mm). Каждый проволочный элемент представлял собой сердечник из сплава НТ50, покрытый слоем меди (М0б). Такую составную заготовку упрочняли многократной экструзией через канал с тремя зонами сдвига при величине накопленной за цикл деформации $\varepsilon_i < 1$. Предлагаемый способ и режимы обеспечивали многоцикловую обработку труднодеформируемого композита с формированием СМК-структуры.

Таким образом, метод РКМУЭ позволяет осуществлять обработку с формированием равноосной СМК-структуры в составных заготовках и в волокнистых композиционных материалах.

Выводы

1. Рассмотрены схемы РКМУЭ и показаны широкие возможности варьирования интенсивностями 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 малых интенсивностях деформаций в отдельных очагах.

2. Для оценки силового режима процесса РКМУЭ предложена математическая модель процесса.

3. Показано, что недостаток способа равноканальной экструзии, связанный с большими потерями на трение, особенно значительными в устройствах для многоугловой экструзии, преодолевается при реализации процесса в режиме гидроэкструзии. При продавливании заготовки с помощью жидкости высокого давления повышается эффективность смазочного слоя, потери на трение зависят от длины заготовки, а не канала. В сопоставимых экспериментах осредненный по длине канала расчетный коэффициент трения при гидроэкструзии составлял $f = 0.07-0.17$, а при механической экструзии – $f = 0.25-0.50$.

4. Метод РКМУЭ обеспечивает возможности многоциклового обработки сплошных, составных и волокнистых композиционных заготовок с формированием равноосной СМК-структуры во всех составных элементах.

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

1. В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.И. Копылов, *Металлы* № 1, 115 (1981).
2. Z.Y. Liu, Z. Wang, E. Wang, *Mater. Sci. Eng.* **A262**, 137 (1991).
3. Z.Y. Liu, Z. Wang, *J. Mater. Proc. Technol.* **94**, 193 (1999).
4. H.S. Kim, *Mater. Sci. Eng.* **A315**, 122 (2001).
5. H.S. Kim, M.H. Seo, S.I. Hong, *J. Mater. Proc. Technol.* **113**, 622 (2001).
6. А.Б. Дугадко, Н.И. Матросов, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк, В.А. Белошенко, Э.А. Медведская, А.А. Давиденко, Б.А. Шевченко, Заявка на патент Украины ¹ 2003043401 от 15.04.2003 г.
7. Э.А. Медведская, Н.И. Матросов, А.Б. Дугадко, В.З. Спусканюк, В.А. Белошенко, Б.А. Шевченко, Патент Украины № 58015А, Опубл. 15.07.2003 г., Бюл. №7
8. В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк, Н.И. Матросов, А.Б. Дугадко, Б.А. Шевченко, Э.А. Медведская, Л.Ф. Сенникова, А.В. Спусканюк, Е.А. Павловская, *ФТВД* **12**, № 4, 31 (2002).
9. В.А. Белошенко, Э.А. Медведская, Н.И. Матросов, В.З. Спусканюк, Б.А. Шевченко, А.Б. Дугадко, *ФТВД* **13**, № 1, 121 (2003).
10. Б.А. Колпачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов, *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*, МИСИС, Москва (2001).
11. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, *Процессы пластического структурообразования металлов*, Наука и техника, Минск (1994).
12. А.П. Гетманский, Я.Е. Бейгельзимер, А.И. Гулак, Ю.А. Палант, Н.А. Кулеско, *ФТВД* вып 5, 70 (1981).

*V.Z. Spuskanyuk, A.B. Dugadko, I.M. Kovalenko, N.I. Matrosov,
A.V. Spuskanyuk, B.A. Shevchenko*

PECULIARITIES OF EQUAL-CHANNEL MULTIANGULAR EXTRUSION

Different schemes of the equal-channel multiangular extrusion (ECMAE) have been analysed, some peculiarities and potentialities have been illustrated. A mathematical model is proposed to estimate the operation forces. Contact friction has been estimated for the case of high-pressure liquid application.

Fig. 1. Schemes of ECMAE: a – S-shaped; \bar{b} – three-angular; \bar{e} – four-angular

Fig. 2. Distribution of equivalent deformation over billet section for different stages of three-angular extrusion

Fig. 3. Changes in equivalent deformation, depending on billet travel, in typical points of cross-section: 1, 2 – on lateral surfaces, 3 – on the axis