

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ МЕДИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

© Шестаков Николай Александрович, д-р техн. наук; Субич Вадим Николаевич, д-р техн. наук;  
Шукшин Александр Васильевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет». Россия, Москва. E-mail: shes-v@mail.msiu.ru

Статья поступила 19.04.2013 г.

Приведены данные о новом процессе достижения большой степени пластической деформации реверсивным выдавливанием в объемных заготовках с целью формирования мелкозернистой структуры. Разработан алгоритм этапов нагружения заготовки, обеспечивающий равномерное накопление степени деформации по ее объему. Приведены данные о кинематике течения металла, полученной путем моделирования процесса реверсивного выдавливания в Deform. Новая технология апробирована экспериментально с использованием меди М1. Проведено исследование микроструктуры после достижения степени деформации 5,5–6. Показана возможность получения объемной заготовки с величиной зерна 5–8 мкм.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением; многоэтапная деформация; мелкозернистая структура.

Тонкостенные детали из меди типа облицовок широко применяются во многих отраслях промышленности в изделиях различного назначения, в частности нефтегазодобывающей, для пробивания обсадных труб, образования шпуров, получения отверстий в плитах из различного материала и т.д. Эксплуатационные свойства облицовок определяются точностью их размеров и установки в корпус снаряда, а также структурой материала.

В работе [1] приведены некоторые количественные и качественные характеристики облицовок, наиболее существенно влияющие на их эксплуатационные свойства. Относительный вклад совокупных несовершенств геометрической формы облицовки и точности ее расположения в корпусе снаряда в снижение эксплуатационных свойств, которым в большинстве известных рекомендаций отводится доминирующая роль, сравнивался с вкладом величины зерна. Основным выводом состоит в том, что преобладающим фактором, снижающим эксплуатационные свойства облицовок, является величина зерна материала. Установлено, что при уменьшении величины зерна с 0,3 до 0,1 мм эффективность облицовок увеличивается почти в два раза, в то время как устранение других упомянутых выше погрешностей приводит к росту эффективности примерно в 1,5 раза. Отсюда следует актуальность работ, направленных на получение мелкозернистой структуры материала облицовок.

Одним из важнейших преимуществ процессов обработки металлов давлением (ОМД) является

возможность целенаправленного формирования заданной структуры и физико-механических свойств материала изделий. Резервы повышения всего комплекса структурно-чувствительных свойств материалов при ОМД связаны с созданием и управлением такими факторами формирования свойств, как большие пластические деформации (БПД, иногда их называют интенсивными – ИПД), схема напряженного состояния, температурно-скоростные условия деформации, траектория деформации.

В числе процессов, которые позволяют реализовать БПД, в основном называют кручение на наковальнях Бриджмена, равноканальное угловое прессование (РКУП), ковку с чередующимися последовательно операциями осадки и протяжки (всесторонняя ковка) и винтовую экструзию (ВЭ). Указанные методы реализации БПД характеризуются рядом конструктивно-технологических недостатков, ограничивающих возможности их промышленного применения. Ограничения, связанные с применением кручения на наковальнях Бриджмена, во многих случаях устраняются в процессах штамповки с кручением, которые получили достаточное теоретическое, экспериментальное и промышленное обоснование [2]. Однако применение процесса штамповки с кручением ограничивается классом сравнительно невысоких поковок с отношением диаметра к высоте  $d/h \ll 1$  и только на специальных прессах с вращающимся штамподержателем [2].



Применение РКУП [3] дает возможность получать заготовки вытянутой формы круглого или прямоугольного сечения при использовании относительно простой конструкции штамповой оснастки только для пластичных материалов (медь, алюминий, никель). Для достижения больших степеней деформации заготовку после первого прессования извлекают из приемного канала и подвергают повторному прессованию. Число циклов прессования выбирается в зависимости от требуемой степени деформации. При этом возникают сложности с извлечением заготовки после каждого цикла прессования и ее установкой для очередного прессования. Как правило, для установки заготовки в канал для очередного прессования необходима механическая обработка.

Существуют также ограничения по длине  $L$  обрабатываемой заготовки ( $L/d = 4-6$ , где  $d$  – диаметр или характерный размер прямоугольного поперечного сечения заготовки) из-за необходимости преодоления сил трения. Кроме этого, остаются большие недеформированные концевые участки. Для обработки материалов с пониженной пластичностью возникает необходимость в существенном усложнении технологической оснастки из-за применения устройств для создания противодействия. Аналогичные недостатки характерны для винтовой экструзии [4].

Всесторонняя ковка применяется для получения большой степени деформации нагретых заготовок из различных металлов, как правило, в изотермических условиях, что существенно ограничивает область ее применения для формирования ультрамелкозернистых (УМЗ) и субмикроструктур (СМК) структур. Достижение БПД, соответствующей образованию УМЗ- и СМК-структур при холодной деформации, ограничено недостаточной пластичностью металлических материалов.

Недостатки традиционных процессов обработки стимулируют поиск и разработку новых схем пластического деформирования, позволяющих более полно реализовать возможность пластической деформации как одного из наиболее эффективных средств формирования структуры металлов и сплавов.

Цель настоящей работы – исследование кинематики течения при реверсивном выдавливании угловыми пуансонами и влияния накопленной деформации на формирование УМЗ- и СМК-структур в объемных заготовках из меди М1, применяемых для производства облицовок.

Сущность нового процесса заключается в следующем. Исходную заготовку 1 (рис. 1, а) помещают в канал 3, на пуансон 2. На заготовку устанавливают пуансон 4, который осуществляет деформирование силой  $P$  при параллельном (рис. 1, б) либо встречном (рис. 1, в) направлении рабочих поверхностей пуансонов. Для снижения сил трения матрица может быть плавающей. Канал матрицы 3 может иметь круглое или прямоугольное сечение. Накопление деформации, необходимой для формирования требуемой структуры, происходит в несколько этапов по способу 1 и по способу 2 (см. рис. 1) в различных комбинациях. Между этапами может быть предусмотрена калибровка (рис. 1, г), которая может быть и завершающим этапом. При исследовании кинематики течения ставились две задачи:

- исключение дефектов в виде складок и зажимов;
- достижение максимально равномерного распределения деформаций по объему заготовки, необходимого для формирования однородной структуры.

На рис. 2 представлен алгоритм, демонстрирующий различные комбинации этапов деформирования. Переход к очередному этапу деформирования осуществляется путем вывода пуансонов 2 или 4, или обоих одновременно из канала матрицы 3, поворота их на  $180^\circ$  и нового нагружения. Извлечение заготовки произ-

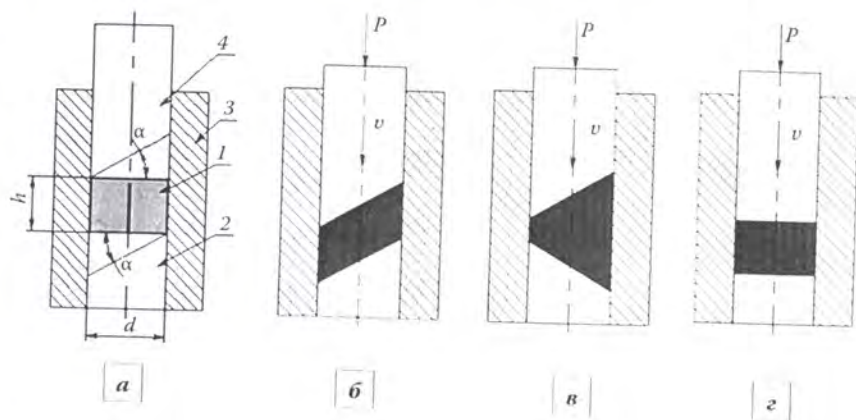


Рис. 1. Схема процесса выдавливания угловыми пуансонами: а – исходное состояние; б – 1-й способ; в – 2-й способ; г – калибровка



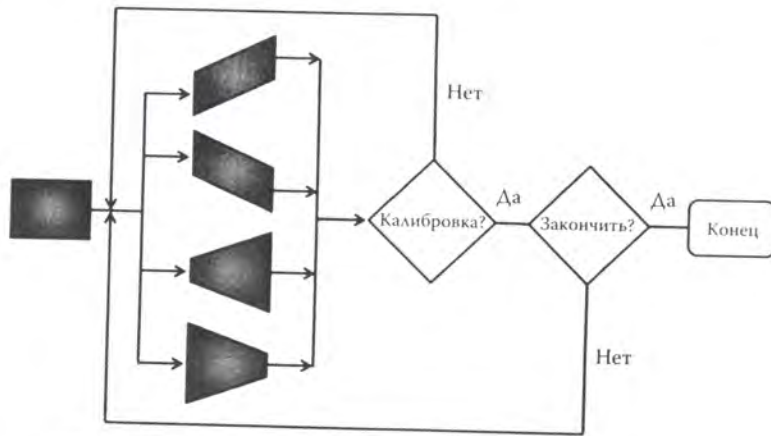


Рис. 2. Алгоритм процесса выдавливания угловыми пуансонами

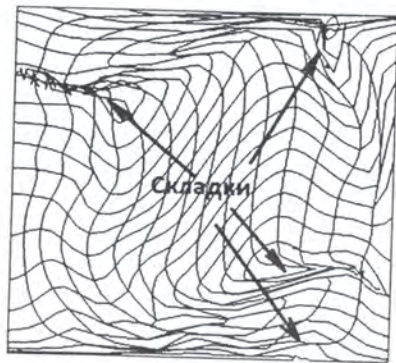


Рис. 3. Дефекты деформированной заготовки в виде складок

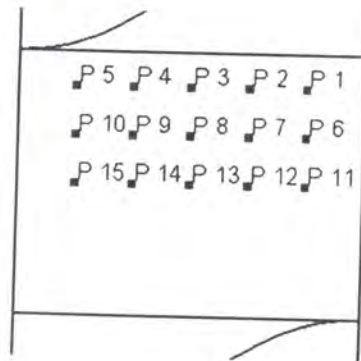


Рис. 4. Расчетная схема и начальное положение трассируемых точек

водится только после необходимого числа этапов нагружения.

Возможности предложенного метода исследовали в программном комплексе Deform D. Начальные условия моделирования: плоское деформированное состояние; оборудование – пресс со скоростью движения ползуна 1 мм/с; размеры сечения:  $h = 24$  мм,  $d = 36$  мм (см. рис. 1); коэффициент трения принимали равным нулю; температура заготовки и инструмента 20 °С; углы пуансонов  $\alpha$  принимали равными 30°, 35°, 40°, 45°, 50°. Для плоского деформированного состояния в Deform размеры, перпендикулярные плоскости чертежа, по умолчанию принимаются равными единице.

В качестве материала для виртуальных и экспериментальных исследований была выбрана медь М1. Кривая упрочнения меди М1 аппроксимирована по данным [5] зависимостью  $\sigma_s = 435\epsilon_0^{0,15}$ , где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала,  $\epsilon_0$  – степень деформации.

Пробное моделирование показало, что на образование дефектов в виде зажимов основное влияние оказывает угол  $\alpha$ . Характерный вид модели со складками приведен на рис. 3. Установлено, что образование складок не наблюдается при уменьшении угла  $\alpha$  до 30°. Дальнейшее исследование проводили при использовании этого зна-

чения угла. Применение углов меньше 30° нецелесообразно в связи с возрастанием числа рабочих ходов пресса для достижения необходимых деформаций.

Решение второй задачи было проведено на основе исследования деформированного состояния в объеме заготовки. Для этого в сечении был принят характерный набор материальных (трассируемых) точек P1–P15 (рис. 4). В силу симметрии процесса деформации расположение трассируемых точек выбрано только для верхней половины заготовки.

В процессе пробного моделирования была установлена возможность управления накоплением деформации в различных областях поперечного сечения обрабатываемой заготовки. При параллельном расположении рабочих поверхностей пуансонов деформация растет в центральных слоях заготовки, а при встречном – в соответствующих краевых зонах. На рис. 5 для принятой комбинации этапов деформации показано последовательное искажение лагранжевых линий, полученных в результате моделирования в Deform.

Адекватность моделирования проверяли экспериментально методом координатных сеток с использованием свинцовых заготовок. Как видно из рис. 5, искажение координатной сетки в сечении натурной заготовки аналогично форме лагранжевых линий, полученных после этапа 1 деформации.

Характер зависимостей степени деформации  $\epsilon_0$  от хода ползуна для трассируемых точек P1, P3, P5, P6, P8, P10, P11, P13, P15 при семи этапах деформирования (см. рис. 5) показан на рис. 6. Под степенью деформации здесь и в дальнейшем понимается ве-

личина  $\epsilon_0 = \int \dot{\epsilon}_i dt$  (где  $\dot{\epsilon}_i = \sqrt{2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}}/3$  – интенсивность скоростей деформации;  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $i, j = 1, 2, 3$ ) [6]. Сопоставление приведенных зависимостей показывает, что деформация



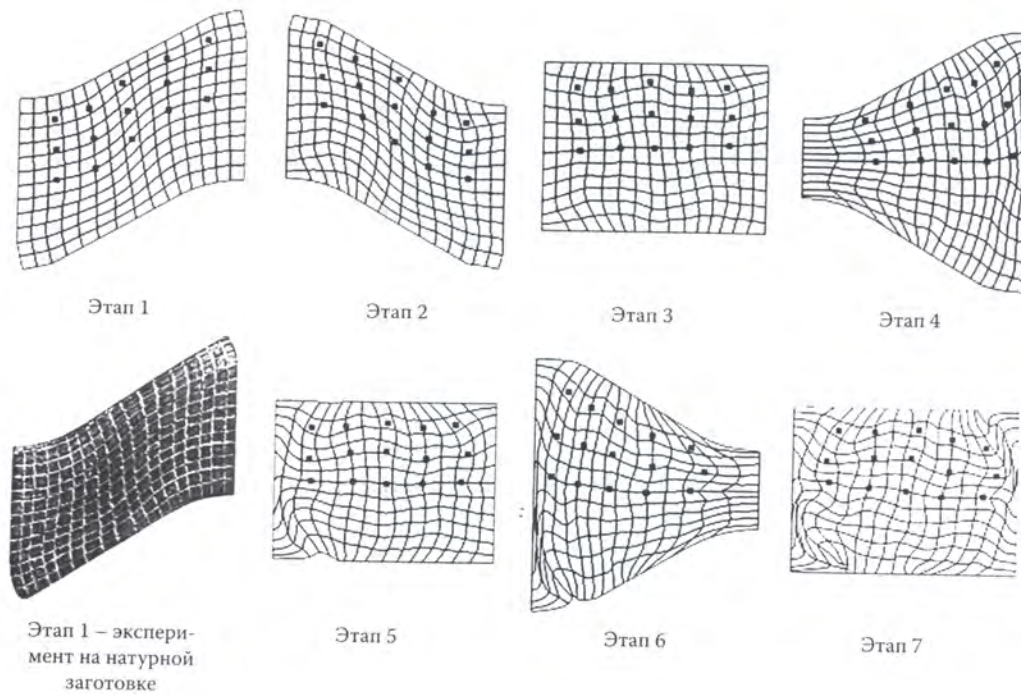


Рис. 5. Поэтапное видоизменение лагранжевых линий, полученное в процессе моделирования реверсивного выдавливания, и результат экспериментальной проверки при деформации натурной заготовки на этапе 1

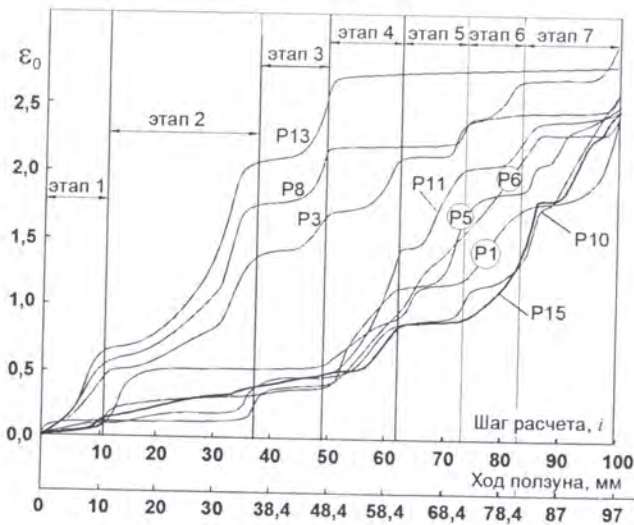


Рис. 6. Зависимость степени деформации  $\epsilon_0$  от хода ползуна и схемы нагружения при семиэтапном деформировании угловыми пуансонами

на этапах 1, 2 и 3 приводит к интенсивному росту степени деформации в точках P3, P8 и P13 и незначительному росту степени деформации в других точках.

Картина существенно меняется на этапах 4–7. В результате распределение степени деформации по сечению заготовки в значительной мере выровнялось. В конце этапа 7 наиболее деформированной областью является

область в окрестности точки P3 ( $\epsilon_0 = 2,8$ ), а наименее деформированной – окрестность точки P1 ( $\epsilon_0 = 2,4$ ), т.е. разница между накопленной деформацией в наиболее и наименее деформированных областях сечения заготовки составила  $\approx 15\%$ .

Существенный вывод из приведенного сопоставления заключается в том, что подбор последовательностей этапов с различными схемами нагружения является инструментом управления и регулирования величины накопленной деформации в различных областях заготовки для получения необходимой степени деформации в заданных областях заготовки для получения структуры с регламентированным по объему размером зерна.

Проведенное конечноэлементное моделирование многоэтапного выдавливания угловыми пуансонами позволило получить полную информацию об истории изменения напряженно-деформированного состояния в трассируемых точках P1–P15 и установить важный параметр процесса, определяющий устойчивость деформируемого материала к разрушению. Оценка схемы напряженного состояния, характеризуемого коэффициентом жесткости  $\eta = 3\sigma_{cp}/\sigma_i$  ( $\sigma_{cp}$  – среднее напряжение,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений), показала, что величина  $\eta$  на всех этапах деформирования находится в пределах



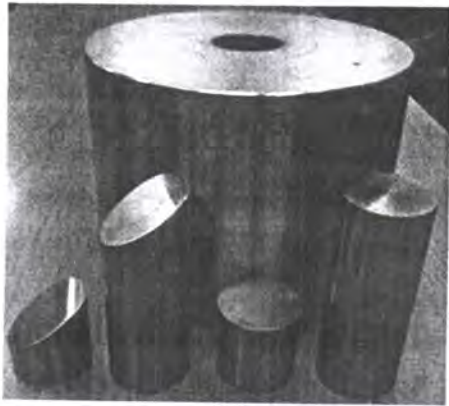


Рис. 7. Экспериментальный штамп

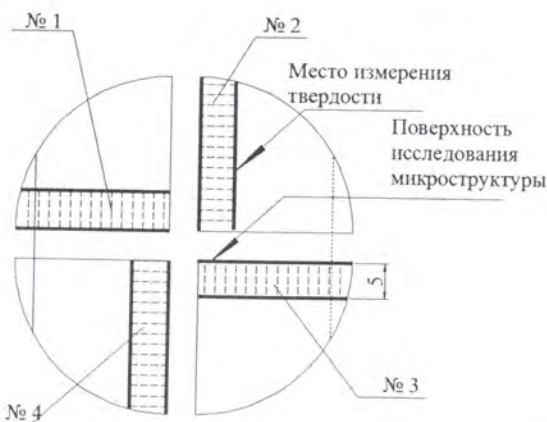


Рис. 8. Схема разрезки деформированной заготовки на образцы (№ 1 – № 4) для исследования микроструктуры

от  $-5$  до  $-0,5$ . При таких схемах напряженного состояния, как правило, удается деформировать до больших степеней деформации даже металлы и сплавы с невысокими пластическими свойствами.

Экспериментальное исследование микроструктуры деформированных образцов из меди М1 диам. 36 мм, высотой 24 мм. Использовали комбинацию этапов деформации, показанную на рис. 5, а для окончательной подготовки заготовок под штамповку облицовок были введены еще два этапа деформации по способу, показанному на рис. 1, а. В результате расчетная степень деформации достигла  $\epsilon_0 = 5,5-6$  (550–600%). Для эксперимента были использованы круглый контейнер и два комплекта пуансонов: комплект с плоскими торцами для выполнения операции калибровки и пара пуансонов с рабочими поверхностями, расположенными под углом  $30^\circ$  (рис. 7).

Схема вырезки образцов и местоположение областей исследования микроструктуры показана

Результаты измерения твердости отожженных при различной температуре образцов

Номер образца (см. рис. 8)	Термическая обработка (отжиг в течение 40 мин с охлаждением в воде)	Твердость <i>HRF</i> (Роквелл, 60 кгс, шарик 1/16"), измеренная в шести точках каждого образца					
1	380 °С	61	58	60	58	61	61
2	380 °С	60	62	64	63	61	62
3	450 °С	56	50	58	60	56	50
4	450 °С	51	51	60	58	56	59
5	Состояние поставки	38	39	48	51	52	41

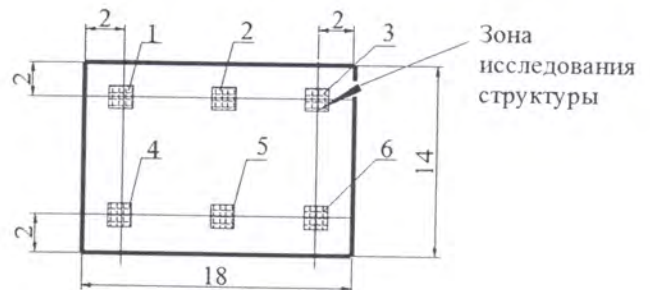


Рис. 9. Зоны исследования микроструктуры на образцах, вырезанных из деформированной заготовки по схеме на рис. 8 (1–6 – номера зон исследования структуры на поверхности образца)

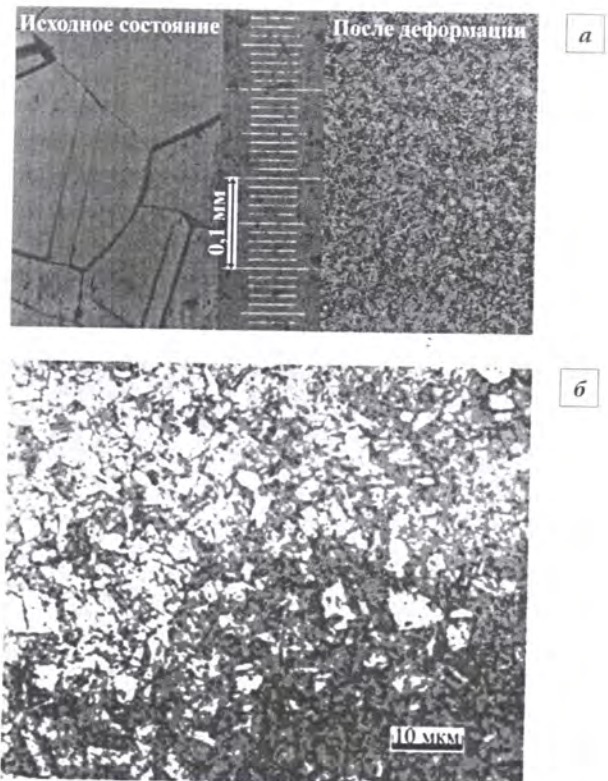


Рис. 10. Исходная микроструктура (слева) и структура деформированного металла (справа): а –  $\times 200$ ; б –  $\times 1000$



ны на рис. 8. Выявление микроструктуры и изменение твердости производили после отжига при температурах 380 и 450 °С. Твердость меди М1 в исходном состоянии 50–52 HRF. Достижение такой твердости являлось критерием для выбора температуры отжига. Достижение твердости исходного состояния свидетельствует о полноте термообработки отжигом. Как следует из таблицы, режим отжига при 450 °С в течение 40 мин обеспечивает полноту отжига. Всего было выполнено 24 фотографии микроструктуры (по шесть измерений на четырех образцах по схеме, показанной на рис. 9).

Определение размера зерна производили по шкале III ГОСТ 21073.1–75. В среднем размер зерна соответствует баллу 10–12, т.е. средней диаметр зерен 5–8 мкм (рис. 10). Измеренный балл зернистости исходного состояния соответствовал баллу 1–2 (0,25–0,17 мм).

**Выводы.** 1. Разработана новая технологическая схема достижения больших степеней пластической деформации, которая может быть положена в основу формирования мелкозернистых структур в заготовках для изготовления облицовок и других изделий из меди.

2. Новая технологическая схема имеет преимущества по сравнению с известными схемами, которые заключаются в упрощении конструкции рабочего инструмента, исключении промежуточных операций по извлечению и уста-

новке заготовки между этапами деформации, отсутствии недеформированных концевых зон и неравномерности деформации по длине заготовки, а также в возможности управления накоплением деформации в различных областях поперечного сечения обрабатываемой заготовки, что позволяет добиваться достаточно равномерного распределения накопленной деформации и по поперечному сечению заготовки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 7.714.2011.*

#### Библиографический список

1. Физика взрыва / Под ред. А.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.
2. Субич В.Н., Демин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В. Штамповка с кручением. М.: МГИУ, 2008. 389 с.
3. Сегад В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
4. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. 87 с.
5. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учеб. пособ. для университетов. М.: Наука, 1969. 420 с.

## STRUCTURE FORMATION OF COPPER AT REVERSE EXTRUDING

© Shestakov N.A., Dr Sc. (Eng.); Subich V.N., Dr Sc. (Eng.); Shukshin A.V.

Data on new process of achievement of big plastic deformations by reversive extruding for voluminal workpieces for the purpose of fine-grained structure formation are provided. The algorithm of stages of loading of the workpiece, providing uniform accumulation of deformation degree by its volume is developed. Data on kinematics of yielding of metal obtained by modeling of reversive extruding in Deform are given. The new technology is approved experimentally using M1 copper. Microstructure was investigated after achievement of 5.5–6 deformation degree. Possibility of obtaining voluminal workpiece with grain size by 5–8 μm is shown.

**Keywords:** metal forming; multi-stage deformation; fine-grained structure.