

УДК 621.791.753.0

А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ**

Рассмотрены силовые характеристики процесса обратного выдавливания экструдированных заготовок из дисперсно-упрочненной меди. Для определения усилий деформирования использовалась методика, разработанная на основе положений теории пластического течения, которая позволила принять обоснованные решения по выбору штамповочных переходов, прессового оборудования и обеспечения прочности штампового инструмента для выдавливания.

Введение

Технологические свойства дисперсно-упрочненной меди, характеризующие обрабатываемость ее давлением, отличаются от медных сплавов, получаемых металлургическим способом, следующими особенностями [1]: меньшей допустимой скоростью нагрева (не более $110\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ при диаметре прутка до 18 мм), ограниченными степенями деформаций, широким температурным интервалом обработки давлением $350\text{...}850\text{ }^{\circ}\text{C}$, большим сопротивлением деформации, выраженной анизотропией физико-механических свойств. Эти особенности физико-механических свойств дисперсно-упрочненных конструкционных материалов (ДУКМ) обусловлены наличием субмикро- или микрокристаллической структуры матрицы с развитой поверхностью границ зерен и субзерен. Границы являются эффективным барьером для движения дислокаций, причем дисперсные включения стабилизируют эти границы при высоких температурах, что приводит к значительному повышению горячей твердости, прочности, препятствует развитию диффузионных процессов и протеканию рекристаллизации.

Деформируемость при температуре нагрева заготовки $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ характеризуется следующими параметрами: допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси – до $50\text{...}56\text{ }%$; уголгиба –

до $22\text{...}27\text{ }%$ (при радиусегиба, равном диаметру прутка); угол закрутки – до $15\text{...}16^{\circ}$ (при диаметре прутка 16 мм). Эти свойства обуславливают невозможность обработки давлением дисперсно-упрочненных материалов в холодном состоянии (за исключением калибровки) и удовлетворительную деформируемость в интервале температур $(0,81\text{...}0,64)T_{\text{пл}}$ основы [2].

При проектировании штампового инструмента, используемого для выдавливания отверстий в заготовках электродов для точечной контактной сварки, следует учитывать различие в коэффициентах линейного расширения материалов заготовки и инструмента (соответственно $16,8 \cdot 10^{-6}$ и $12,4 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) и разницу их температур [3].

Верхняя граница температурного интервала объемной штамповки для дисперсно-упрочненных материалов на основе меди не должна превышать $810\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. к. нагрев на более высокие температуры приводит к снижению эксплуатационных свойств изделий. Нижняя граница температур должна быть не менее $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в связи со снижением стойкости штампового инструмента из-за существенного повышения сопротивления деформированию материала [1].

В идеальном случае оснастка должна иметь температуру нагретой заготовки, но высокая стоимость и дефицитность штамповых сталей, работающих при высоких температурах, обуславливает их

замену полутеплостойкими штамповыми сталями типа 5XHM, работающих при температурах до 450 °С.

При обработке давлением изделий, обладающих малой массой, во избежание снижения температуры в процессе штамповки возможна замена штамповых сталей быстрорежущими, позволяющими производить нагрев штампового инструмента до температур 600 °С.

Наилучшей обрабатываемостью давлением материалы обладают в интервале температур 750...810 °С. Так как обработка проводится ниже температуры рекристаллизации материала, снижения механических свойств не наблюдается.

Обычно обрабатываемость материала пластической деформацией при объемной штамповке оценивается применительно к определенной операции группой показателей [4, 5] и является понятием относительным. Как правило, испытания на штампуемость сводятся к проведению технологической пробы. Для определения возможности получения отверстий, необходимых при изготовлении электродов контактной точечной сварки методами горячей объемной штамповки, были проведены технологические пробы на операции прошивки (обратное выдавливание).

Целью данного исследования являлось установление особенностей процесса обратного выдавливания экструдированных заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди.

Методика исследования

Определение усилий, необходимых для прошивки заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди, требуется для принятия обоснованных решений по выбору штамповочных переходов, прессового оборудования и обеспечения прочности применяемого штампового инструмента. При расчете усилий использовалась методика, разработанная А. М. Дмитриевым

и А. Л. Воронцовым на основе соотношений теории пластического течения [6...8].

Обратным выдавливанием получали глухое отверстие диаметром 10 мм и глубиной 55 мм [9...11]. Исходная заготовка представляла собой цилиндр диаметром 16 мм и высотой 43 мм. Заготовку нагревали до 800 °С в трубной электрической печи. Операцию прошивки производили в штампе, нагретом до 400 °С, в качестве смазки использовалась консистентная смазка «Литол-24».

Расчет деформирующей силы

На основе соотношений теории пластического течения в [6...8, 12] был проведен анализ кинематического и напряженного состояний заготовки при выдавливании пуансоном с плоским торцом (рис. 1). В результате была получена формула для определения удельной деформирующей силы

$$q = 1,1\sigma_s \left[2 + \ln R + \frac{1 + 2\mu R}{2(R^2 - 1)} h + \frac{0,5 + \mu_1}{4h} \right] + q_{TP}. \quad (1)$$

В этих расчетах учитывалось, что в результате сложного распределения давления на стенку матрицы происходит бочкообразное деформирование ее канала, обуславливающее перемещение выдавливаемого материала в сужающееся пространство. Это вызывает дополнительное повышение силы выдавливания.

Влияние деформации канала матрицы на удельную силу выдавливания учитывает член

$$q_{TP} = 1,1\sigma_s \frac{\mu R^3}{(R^2 - 1)^2} s. \quad (2)$$

Усилие выдавливания возрастает до тех пор, пока значение рабочего хода не достигнет величины

$$s_{TP} = \frac{(R^2 - 1)^2}{R^2(1 + \mu R)}, \quad (3)$$

которой соответствует максимальное значение

$$q_{TP} = 1,1\sigma_s \frac{\mu R}{1 + \mu R}. \quad (4)$$

Если значение рабочего хода $s < s_{тр}$, то необходимо использовать выражение (2), если же $s > s_{тр}$, то следует использовать формулу (4).

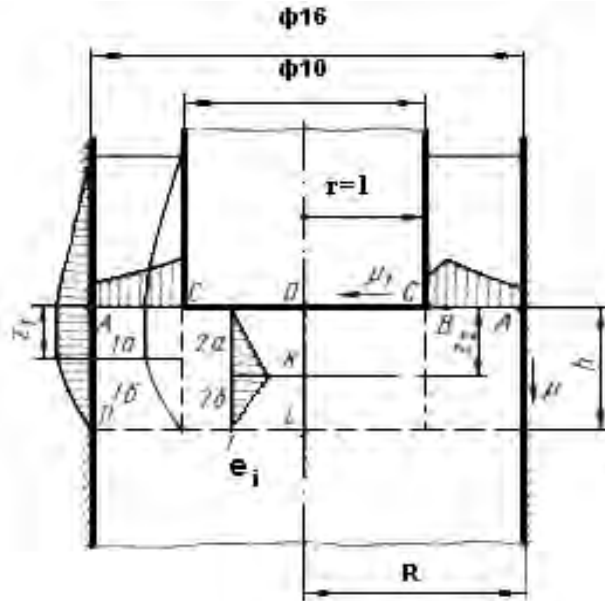


Рис. 1. Схема распределения деформаций на различных участках оснастки при обратном выдавливании

Для исследуемого материала удельная деформирующая сила q при выдавливании отверстия пуансоном с плоским торцом равна:

$$q = 1,1 \cdot 100 \cdot \left[2 + \ln 1,6 + \frac{1 + 2 \cdot 0,5 \cdot 1,6}{2(1,6^2 - 1)} \times \right. \\ \left. \times 0,63 + \frac{0,5 + 0,5}{4 \cdot 0,63} \right] + 35,6 = 409. \quad (5)$$

Максимальное расчетное усилие, действующее на пуансон при выдавливании отверстия диаметром $d = 10$ мм в заготовке с температурой конца обработки давлением 700°C , составляет:

$$P = q \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \\ = 409 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} = 32110 \text{ Н}. \quad (6)$$

Экспериментальные данные, полученные при скорости деформирования $0,017$ м/с, показали высокую сходимость значений. На рис. 2 представлен график зависимости усилия прессы от времени деформирования при выдавливании отверстия в заготовке из дисперсно-упрочненной меди, имеющей температуру начала обработки давлением 800°C и температуру конца обработки 650°C . При отсутствии рекристаллизационных процессов и коэффициенте вытяжки $\lambda = 2,0$ степень деформационного упрочнения составляет $1,09$. Ранее было установлено [1], что степень деформационного упрочнения при растяжении образцов из дисперсно-упрочненной меди, нагретых до температур $600 \dots 800^\circ\text{C}$, не превышает $1,05$. Увеличение степени деформационного упрочнения до значений $1,09$ можно объяснить повышением

сопротивления деформации в результате охлаждения заготовки в процессе выдавливания.

Результаты исследований влияния

формы пуансона на величину удельной силы выдавливания весьма противоречивы.

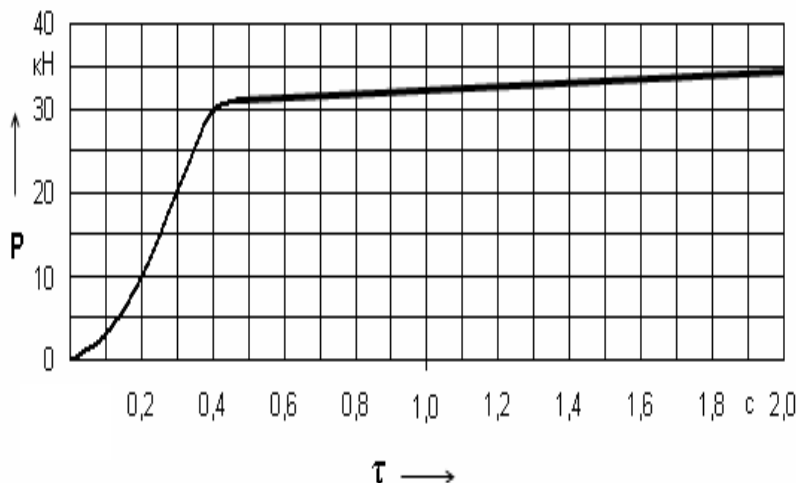


Рис. 2. Зависимость усилия пресса от времени деформирования

В [13] приводятся данные, что обратное выдавливание пуансоном со сферической головкой требует больших усилий, по сравнению с плоским торцом. Результаты исследований [14] утверждают обратное.

Справочник по ковке и штамповке [15] рекомендует конический пуансон с углом конусности $60...75^\circ$ и плоской площадкой с диаметром, равным $0,3...0,5$ от диаметра рабочего пояса. В [16] оптимальным для пуансона считают угол конусности 85° . В [17, 18] показано, что оптимальная форма торца пуансона существенно зависит от величины обжатия.

Заостренная форма торца уменьшает силу выдавливания, но вызывает интенсивное истечение смазочного материала из-под торца инструмента, что приводит к снижению глубины полости, выдавливаемой за один переход [18]. В [19] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследо-

ваний, в которых на основе теории пластического течения были определены величины удельной деформирующей силы q , максимального давления на стенку матрицы p и относительной высоты очага пластической деформации h в зависимости от формы торца пуансона. Оптимальная форма торца пуансона (по усилию деформирования) определяется величинами относительного радиуса матрицы R , контактного трения, а также способностью материала к упрочнению и удержанию смазки.

Для выдавливания глухих отверстий в различных заготовках из дисперсно-упрочненной меди применялись пуансоны с коническим торцом без плоской площадки. Угол образующей конуса α составлял 60° . В этом случае расчет удельной деформирующей силы и относительной высоты очага пластической деформации производился по формулам [19, с. 17] с учетом отсутствия плоской площадки на торце пуансона:

$$\begin{aligned}
 q &= 1,1\sigma_s \left\{ 2 + \ln R + \frac{0,5(1 + \sin \alpha) + 2\mu R}{2(R^2 - 1)} h + \frac{\left(0,5 + \mu_1 \frac{\sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha} \right)}{4h} \right\} = \\
 &= 1,1 \cdot 100 \cdot \left\{ 2 + \ln 1,6 + \frac{0,5(1 + \sin 60^\circ) + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,6}{2(1,6^2 - 1)} \cdot 0,49 + \frac{0,5 + 0,3 \cdot \left(\frac{\sin 60^\circ - \cos 60^\circ}{\sin 60^\circ + \cos 60^\circ} \right)}{4 \cdot 0,49} \right\} + \\
 &\quad + 35,6 = 372,5; \\
 h &= \sqrt{\frac{(R^2 - 1) \left(0,5 + \mu_1 \cdot \frac{\sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha} \right)}{2[0,5(1 + \sin \alpha) + 2\mu R]}} = \sqrt{\frac{(1,6^2 - 1) \cdot \left(0,5 + 0,3 \cdot \frac{\sin 60^\circ - \cos 60^\circ}{\sin 60^\circ + \cos 60^\circ} \right)}{2[0,5(1 + \sin 60^\circ) + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,6]}} = 0,49. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Максимальное расчетное усилие, действующее на пуансон с коническим торцом при выдавливании отверстия диаметром $d = 10$ мм в заготовке при температуре конца обработки давлением 700°C , составит:

$$\begin{aligned}
 P &= q \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 379,5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} = \\
 &= 29220 \text{ Н}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Сопоставление результатов расчета усилий деформирования пуансоном с коническим торцом с экспериментальными данными ($P = 31090 \pm 450$) показало высокую сходимость.

Использование этой методики [6...8] с учетом особенностей исследуемого материала позволяет воспроизвести реальные закономерности процесса выдавливания изделий из заготовок из дисперсно-упрочненной меди и дает возможность установить усилие, необходимое для выдавливания.

Разработанный с использованием предложенной методики технологический процесс обратного выдавливания глубоких полостей при изготовлении электродов для контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников из дисперсно-упрочненной меди позволил повысить качество изделий и сни-

зить на 20...30 % потери металла в стружку, значительно повысить производительность процесса, улучшить эксплуатационные свойства изделий.

Особенности механизма пластической деформации дисперсно-упрочненной меди

Согласно рис. 2 зависимости усилия пресса от времени деформирования можно отметить весьма незначительный рост усилия в процессе выдавливания в условиях неполной холодной деформации, что является характерной технологической особенностью дисперсно-упрочненных композиционных материалов, обладающих микрокристаллической структурой.

В [1] было установлено, что в процессе выдавливания отверстий в заготовках из дисперсно-упрочненной меди в условиях неравномерного всестороннего сжатия и неполной холодной деформации размер и форма зерен не изменяются. На рис. 3 представлены структуры поперечного сечения заготовки диаметром 16 мм до и после выдавливания в ней отверстия диаметром 11 мм (коэффициент вытяжки 1,9). Температура нагрева заготовки – 800°C , матрицы – 450°C , скорость деформиро-

вания – 0,017 м/с.

Согласно рентгеноструктурным исследованиям, у исследуемого материала в процессе выдавливания в указанных условиях плотность дислокаций

увеличивается незначительно (от $5 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), что свидетельствует о практическом отсутствии деформационного упрочнения в условиях холодной деформации (рис. 4).

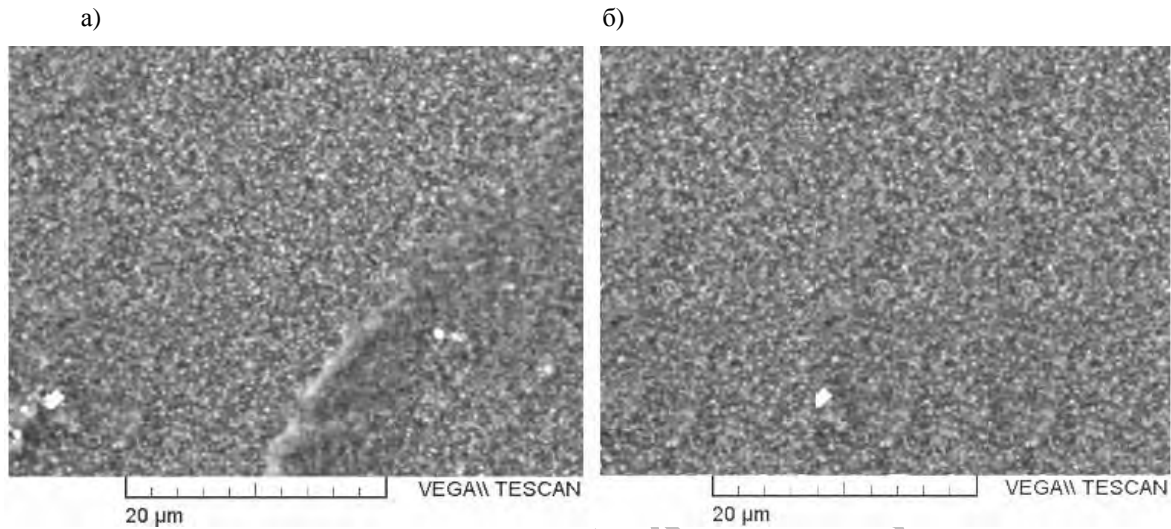


Рис. 3. Структура поперечного сечения заготовки из дисперсно-упрочненной меди до (а) и после (б) выдавливания

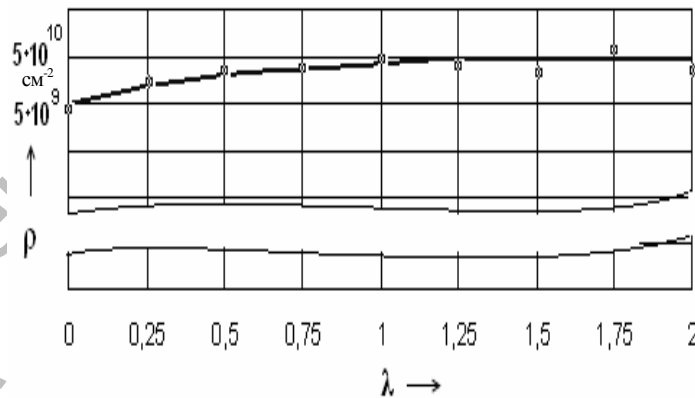


Рис. 4. Влияние коэффициента вытяжки на плотность дислокаций

Это свидетельствует о том, что внутри зерен затруднено действие основных механизмов внутризеренных деформаций (скольжения и двойникового). Слабое деформационное упрочнение дисперсно-упрочненной меди (наклеп) связано с тем, что накопление дислокаций у препятствий (дисперсных

частиц Al_2O_3 , развитых границ зерен) подавляет деятельность источников дислокаций, в том числе и механизм размножения Франка-Рида. В материале с микрокристаллическим типом структуры границы зерен являются стоками для дислокаций. При этом дислокации скользят от одной границы к другой, не

пересекаясь друг с другом. Основным механизмом деформации является зернограничное проскальзывание, предотвращающее образование сложных дислокационных структур и деформационное упрочнение.

Схема эволюции микроструктуры при пластической деформации в соответствии с моделью Эшби-Веррала [20] позволяет объяснить причины сохранения размера и формы зерен. Подтверждением этой технологической особенности материала является то, что в условиях неполной холодной деформации при реализации схемы всестороннего сжатия он проявляет более высокие пластические свойства, чем другие медные сплавы.

Заключение

1. К характерным особенностям материала относятся:

- постоянная низкая степень упрочнения при растяжении (около 1,05) при любых температурах испытания. Слабое деформационное упрочнение дисперсно-упрочненной меди (наклеп) связано с тем, что накопление дислокаций у препятствий (дисперсных частиц Al_2O_3 , границ зерен) подавляет деятельность источников дислокаций, в том числе и механизм размножения Франка-Рида;

- высокая пластичность материала в условиях всестороннего неравномерного сжатия при неполной холодной деформации, объясняемая отсутствием деформационного упрочнения и межзеренным механизмом скольжения.

2. Наибольший вклад в пластическую деформацию вносит межзеренный механизм скольжения в связи с тем, что в материале, обладающем микрокристаллической структурой, затруднено действие механизмов, характерных для внутриверенных деформаций (скольжение и двойникование).

3. Полученные экспериментальные данные подтверждают адекватность

основных положений теории пластического течения и методики расчета накопленных деформаций с учетом особенностей исследуемого материала, что позволяет воспроизвести реальные закономерности процесса выдавливания заготовок, обладающих микрокристаллической структурой, и принять обоснованные решения по выбору прессового оборудования и обеспечения прочности штампового инструмента.

4. Разработанный с использованием предложенной методики технологический процесс обратного выдавливания глубоких полостей, необходимых при изготовлении электродов для контактной точечной сварки из дисперсно-упрочненной меди, позволил повысить качество изделий и их эксплуатационные свойства, увеличить производительность процесса и снизить на 25...30 % потери металла в стружку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хабибуллин, А. И.** Технологические особенности обработки давлением заготовок из дисперсно-упрочненной меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 104–111.
2. **Хабибуллин, А. И.** Термомеханические параметры объемной штамповки дисперсно-упрочненных медных сплавов / А. И. Хабибуллин, В. Ф. Пацей // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2006 г. : в 3 ч. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 1. – С. 246.
3. **Хабибуллин, А. И.** Особенности проектирования технологической оснастки для прошивки заготовок из дисперсно-упрочненного материала на основе меди / А. И. Хабибуллин, В. Ф. Пацей // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г. : в 3 ч. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – Ч. 1. – С. 220.
4. **Громов, Н. П.** Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.
5. **Смирнов, В. С.** Сопrotивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин. – М. : Металлургия, 1975. – 271 с.

6. **Воронцов, А. Л.** Анализ начальной стадии обратного выдавливания / А. Л. Воронцов // Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций : межвуз. сб. науч. тр. – М., 1986. – С. 100–104.
7. **Воронцов, А. Л.** Деформированное состояние заготовки при обратном выдавливании / А. Л. Воронцов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 3. – С. 113–117.
8. **Дмитриев, А. М.** Определение технологических параметров выдавливания полых цилиндрических изделий / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справочник. Инженерный журн. – 2002. – № 2. – С. 10–17.
9. **Хабибуллин, А. И.** Формообразование заготовок из дисперсно-упрочненной меди обработкой давлением / А. И. Хабибуллин, В. Ф. Пацей // Современные технологии, материалы, машины и оборудование : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2002 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2002. – С. 221–222.
10. **Хабибуллин, А. И.** Особенности прошивки заготовок из дисперсно-упрочненного материала на основе меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г. : в 3 т. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2007. – Т. 2. – С. 88–91.
11. **Пацей, В. Ф.** Особенности формообразования штамповкой заготовок из дисперсно-упрочненной меди / В. Ф. Пацей, А. И. Хабибуллин // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2004. – № 1. – С. 140–143.
12. **Колмогоров, В. Л.** Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
13. **Глебов, И. Ф.** Геометрия рабочего инструмента для холодного выдавливания металлов / И. Ф. Глебов // Машиностроитель. – 1966. – № 2. – С. 5–7.
14. **Овчинников, А. Г.** Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение. 1983. – 200 с.
15. Ковка и штамповка : справочник в 4 т. Т. 3 : Холодная объемная штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1987. – 381 с.
16. **Эверхарт, Д.** Холодное прессование металлов / Д. Эверхарт. – М. : Машиностроение, 1968. – 148 с.
17. Холодное выдавливание цилиндрических деталей из малоуглеродистой стали / Л. Б. Басовский [и др.] // Кузнечно-штамповое производство. – 1977. – № 9. – С. 14–16.
18. **Филимонов, Ю. Ф.** Штамповка прессованием / Ю. Ф. Филимонов, Л. А. Позняк. – М. : Машиностроение, 1964. – 188 с.
19. **Дмитриев, А. М.** Влияние формы пуансона на силу выдавливания и качество полых цилиндрических изделий / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справочник. Инженерный журн. – 2002. – № 3. – С. 16–22.
20. **Smallman, R. E.** Physical Metallurgy and Advanced Materials / R. E. Smallman, A. H. W. Ngan. – Elsevier : Amsterdam, 2007. – 672 p.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 08.11.2010

A. I. Khabibullin, F. G. Lovshenko
The peculiarities of the process of backward extrusion of blanks produced from dispersion strengthened copper

Force characteristics of the process of backward extrusion of blanks from dispersion strengthened copper are considered. For determining the distortion forces, the methods were used that were developed based on the theory of plastic flow. It allowed making substantiated decisions about the selection of stamping setups and pressing equipment and securing the strength of stamping extrusion tools.