

PACS: 81.40.Lm, 81.40.Pq

В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, И.М. Коваленко

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИЛОВОГО РЕЖИМА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

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

Статья поступила в редакцию 25 марта 2008 года

Предложен метод прогнозирования силового режима процесса равноканального углового прессования (РКУП). Оценка контактного трения осуществляется по закону Зибеля. Сопоставлены теоретическая и экспериментальная зависимости давления прессования от перемещения пресс-штемпеля.

Разработка методов интенсивной пластической деформации (ИПД) остается актуальным направлением исследований, одной из главных целей которых является создание пригодных для промышленного применения технологий производства материалов с наноструктурой либо субмикроструктурой, отличающихся повышенным уровнем свойств.

Одним из наиболее перспективных методов ИПД является РКУП [1]. Метод широко используется при исследовании изменений структуры и свойств металлов и сплавов в результате ИПД. Достоинством метода является возможность формирования наноструктурного состояния материалов в объемных образцах, причем обеспечивается достаточно однородное распределение параметров структуры и свойств по их объему. В то же время высокий уровень давлений РКУП ограничивает возможности обработки прочных материалов. Силы трения заготовки о стенки рабочего канала являются причиной значительного повышения давления прессования с увеличением длины заготовок. Этот недостаток преодолевается при использовании разрабатываемого нами метода угловой гидроэкструзии (УГЭ), согласно которому заготовка выдавливается из рабочего канала через угловую матрицу жидкостью, сжатой до высокого давления [2].

Научный и практический интерес представляют результаты исследований контактного трения в процессах РКУП и УГЭ, разработка расчетных соотношений для определения напряжений трения и рабочего давления. В [1] представлены результаты аналитического исследования напряженно-деформированного состояния материала при РКУП, распределения давлений в рабочем канале, при этом давление определяется с использованием закона Амонто-

на–Кулона. В работах [3–5] показано, что учет элементарных сил трения путем осреднения коэффициента трения по нормальному давлению целесообразно вести в процессах с малыми гидростатическими давлениями. В этих условиях не возникает возможности получения расчетных значений напряжения трения, превышающих максимальное значение напряжения сдвига k . При больших гидростатических давлениях учет элементарных сил трения целесообразно вести путем осреднения напряжений трения, используя закон Зибеля. Такая необходимость может иметь место при РКУП длинномерных заготовок и высоком уровне контактного трения в рабочем канале.

В данной работе предложены выражения для давления РКУП с использованием коэффициентов пластического трения. При этом учитывается упрочнение материала и рассматривается изменение давления РКУП по ходу процесса. Предложены соотношения для пересчета значения коэффициента пластического трения по величине коэффициента кулоновского трения применительно к условиям процесса. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенных формул.

Силовой режим процесса в начальной стадии

При анализе напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе РКУП [1] принято, что на нижней стенке выходного канала действуют нормированные на площадь поперечного сечения канала нормальная сила F_N и сила трения μF_N (рис. 1). Тогда абсолютное значение силы трения металла в выходном канале

$$Q = \mu F_N S, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения канала.

Эта же сила может быть выражена с использованием коэффициента пластического трения в выходном канале m_2 в виде

$$Q = m_2 k S_c, \quad (2)$$

где S_c – площадь контакта заготовки с поверхностью выходного канала. Приравнявая представленные выражения силы трения, получаем соотношение коэффициентов трения в виде

$$\mu = m_2 \frac{k S_c}{F_N S}. \quad (3)$$

Площадь контакта заготовки с инструментом в выходном канале выражается как

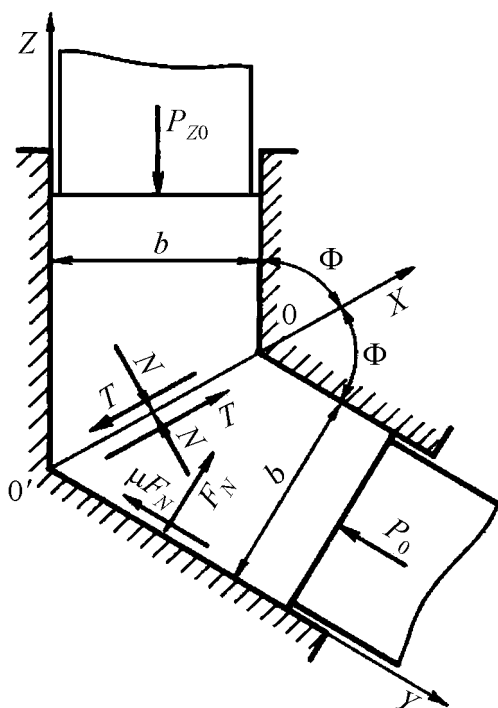


Рис. 1. Схема действия сил на заготовку и инструмент при РКУП [1]

$$S_c = Sn = G\Delta z, \quad (4)$$

где n – показатель соотношения площадей S_c и S , G – периметр канала, Δz – величина смещения верхнего торца заготовки. Тогда из (3) и (4) имеем

$$\mu = m_2 \frac{kn}{F_N}, \quad (5)$$

где $n = 4\Delta\bar{z}$, $\Delta\bar{z}$ – относительная величина смещения верхнего торца заготовки ($\Delta\bar{z} = \Delta z / D$ для канала круглого сечения и $\Delta\bar{z} = \Delta z / B$ – для канала квадратного сечения, D – диаметр, B – сторона квадрата рабочего канала).

Учитывая [1], что

$$F_N = k + p \operatorname{ctg}\Phi,$$

получаем

$$\mu = m_2 \frac{kn}{k + p \operatorname{ctg}\Phi}, \quad (6)$$

где p – гидростатическое давление на линии сдвига.

Из выражения для гидростатического давления на линии сдвига [1]

$$p = \frac{p_0 + k(\mu + \operatorname{ctg}\Phi)}{1 - \mu \operatorname{ctg}\Phi} \quad (7)$$

(где p_0 – противодействие) следует, что

$$\mu = \frac{p - p_0 - k \operatorname{ctg}\Phi}{k + p \operatorname{ctg}\Phi}. \quad (8)$$

Тогда из (6), (8) и выражения для осевого давления в нижней части рабочего канала [1]:

$$p_{Z_0} = p + k \operatorname{ctg}\Phi \quad (9)$$

получаем его выражение с использованием коэффициента пластического трения в виде

$$p_{Z_0} = p_0 + 2k \operatorname{ctg}\Phi + m_2 kn. \quad (10)$$

Из (10) может быть рассчитана величина коэффициента трения в выходном канале

$$m_2 = \frac{1}{kn} (p_{Z_0} - p_0 - 2k \operatorname{ctg}\Phi). \quad (11)$$

Для учета упрочнения материала целесообразно использовать осредненную величину максимального сдвигающего напряжения в виде $k_m = \sqrt{k_0 k_d}$, где k_0 и k_d – значения максимального сдвигающего напряжения материала соответственно в исходном состоянии и после деформации. Тогда

$$p_{Z_0} = p_0 + 2k_m \operatorname{ctg}\Phi + m_2 k_d n. \quad (12)$$

Давление на пресс-штемпеле определяется как

$$p_Z = p_{Z_0} + p_{f_1}, \quad (13)$$

где p_{f_1} – составляющая, отражающая удельное усилие, обусловленное силами трения заготовки о стенки рабочего канала, которая оценивается как

$$p_{f_1} = 4m_1 k_0 \bar{z}. \quad (14)$$

Здесь m_1 – коэффициент пластического трения металла о стенки рабочего канала, \bar{z} – относительная длина заготовки в рабочем канале, для круглого сечения $\bar{z} = z/D$, для квадратного – $\bar{z} = z/B$. Тогда давление прессования определяется из (12)–(14) выражением

$$p_Z = 2k_m \operatorname{ctg}\Phi + 4m_1 k_0 \bar{z} + m_2 k_d n + p_0. \quad (15)$$

С учетом того, что $n = 4\Delta\bar{z}$, давление составляет

$$p_Z = 2k_m \operatorname{ctg}\Phi + 4m_1 k_0 \bar{z} + 4m_2 k_d \Delta\bar{z} + p_0. \quad (16)$$

При $\Delta\bar{z} \ll 1$ приращение давления за счет трения в выходном канале мало, и его величиной можно пренебречь. Тогда

$$p_Z = 2k_m \operatorname{ctg}\Phi + 4m_1 k_0 \bar{z}_0 + p_0, \quad (17)$$

где \bar{z}_0 – исходная относительная длина заготовки.

Для прогнозирования силового режима РКУП важно правильно оценивать не только величину коэффициента трения с учетом эффективности смазочного слоя, но и прочностные свойства деформируемого материала. Более точная оценка силового режима РКУП достигается при корректном назначении величины напряжения пластического сдвига деформируемого материала. Ее величина определяется с учетом скорости деформации, которая, в свою очередь, рассчитывается с учетом значения коэффициента пластического трения. Среднее по очагу сдвига значение скорости деформации при РКУП рассчитывается по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2V_p \operatorname{ctg}\Phi}{D\sqrt{3}\operatorname{tg}\theta}, \quad (18)$$

где V_p – скорость прессования, 2θ – угол разворота центрированного веера, согласно [1] имеем $2\theta = \pi - 2\Phi - \arccos \frac{\tau_f}{k}$ (τ_f – напряжение контактного трения).

Связь с расчетными соотношениями теории [1]

В принятых обозначениях формула для давления прессования, полученная в [1], имеет вид

$$p_Z = p_{Z_0} \exp(4\mu c\bar{z}). \quad (19)$$

Здесь $\bar{Z} = \frac{Z}{D}$ для круглого сечения, $\bar{Z} = \frac{\sqrt{\pi}Z}{2B}$ – для квадратного.

Из сопоставления (13) и (19) с учетом (14) определяется соотношение значений коэффициентов трения в рабочем канале

$$m_1 = \frac{p_{Z_0}}{4k_0z} [\exp(4\mu c\bar{z}) - 1]. \quad (20)$$

Наконец, если полагать, что $m_1 = m_2 = m$, то из (12), (16) и (19) следует

$$m = \frac{(p_0 + 2k_m \text{ctg}\Phi) [\exp(4\mu c\bar{z}) - 1]}{4k_0\bar{z} - 4k_d\Delta\bar{z} [\exp(4\mu c\bar{z}) - 1]}. \quad (21)$$

Такой пересчет значений коэффициентов трения m по значениям μ , формулам (20), (21), естественно, обеспечивает одинаковые результаты для p_Z по (16) и (19).

Зависимость давления РКУП от перемещения пресс-штемпеля

Зависимость давления от относительного перемещения пресс-штемпеля выражается в виде

$$p_Z(\Delta\bar{z}) = p_S + p_{f_1}(\Delta\bar{z}) + p_{f_2}(\Delta\bar{z}) + p_0, \quad (22)$$

где $p_S = 2k \text{ctg}\Phi$ – давление, необходимое для простого сдвига металла без учета сил трения; $p_{f_1}(\Delta\bar{z})$ и $p_{f_2}(\Delta\bar{z})$ – составляющие давления, отражающие влияние сил трения соответственно в рабочем и выходном каналах.

Зависимость составляющей $p_{f_1}(\Delta\bar{z})$, обусловленной силами трения заготовки о стенки рабочего канала, от величины перемещения пресс-штемпеля с учетом (14) имеет вид

$$p_{f_1}(\Delta\bar{z}) = 4m_1k(\bar{z}_0 - \Delta\bar{z}). \quad (23)$$

По мере выдавливания заготовки из рабочего канала увеличивается площадь ее контакта со стенками выходного канала, равная, как обозначено выше (4), $S_c = \Delta zG$. Тогда зависимость силы трения металла в выходном канале от величины перемещения пресс-штемпеля выражается аналогично (2) в виде

$$Q = m_2k\Delta zG, \quad (24)$$

а зависимость удельного усилия, обусловленного трением заготовки о стенки выходного канала, от относительного перемещения $\Delta\bar{z}$ составляет

$$p_{f_2}(\Delta\bar{z}) = \frac{Q}{S} = 4m_2k\Delta\bar{z}. \quad (25)$$

Следовательно, зависимость давления РКУП от относительного перемещения пресс-штемпеля имеет вид

$$p_Z(\Delta\bar{z}) = 2k\text{ctg}\Phi + 4m_1k(\bar{z}_0 - \Delta\bar{z}) + 4m_2k(\Delta\bar{z}) + p_0, \quad (26)$$

причем необходимо учитывать, что в составляющей $4m_2k(\Delta\bar{z})$ величина $\Delta\bar{z}$ не может превышать относительную длину выходного канала.

В случае РКУП неупрочняемого материала, если $m_1 = m_2 = m$ и величина относительного перемещения пресс-штемпеля не превышает относительную величину выходного канала, получается

$$p_Z(\Delta\bar{z}) = 2k\text{ctg}\Phi + 4mk\bar{z}_0 + p_0, \quad (27)$$

т.е. после прохождения передней части заготовки через очаг сдвиговой деформации уровень давления остается постоянным, не зависит от положения пресс-штемпеля в рабочем канале до тех пор, пока выдавленная часть заготовки не начнет выходить из матрицы и фактически будет уменьшаться поверхность ее контакта с инструментом.

С учетом упрочнения выражение (26) принимает вид

$$p_Z(\Delta\bar{z}) = 2k_m\text{ctg}\Phi + 4m_1k_0(\bar{z}_0 - \Delta\bar{z}) + 4m_2k_d(\Delta\bar{z}) + p_0. \quad (28)$$

Полученные выражения (26), (28) позволяют достаточно просто приблизительно оценить уровень рабочего давления РКУП и характер его изменения по мере выдавливания заготовки из рабочего канала, что бывает необходимо на практике. Более точная оценка достигается, если учесть неравномерное по высоте заготовки распределение напряжений осевого σ_z , радиального σ_r и контактного τ_f [1,4,5]. Это можно сделать, если принять различные величины коэффициентов пластического трения на разных участках рабочего канала. Например, в выражении (23) для составляющей p_{f_1} принимать при $\Delta\bar{z} = (0 - 0.5)\bar{z}_0$ одну величину коэффициента пластического трения, а при $\Delta\bar{z} = (0.5 - 1)\bar{z}_0$ брать несколько меньшую величину.

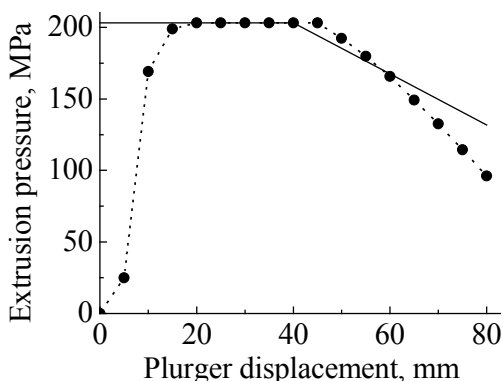


Рис. 2. Зависимость давления прессования от перемещения пресс-штемпеля: ...•... – экспериментальная кривая, — – теоретическая

На рис. 2 представлена экспериментально полученная зависимость давления РКУП свинцовой заготовки длиной 102 mm от перемещения пресс-штемпеля. РКУП заготовки из рабочего канала диаметром 16 mm в перпендикулярный выходной канал протяженностью 40 mm осуществлялось со скоростью $V_p = 0.75$ mm/s без противодействия. С использованием рассчитанной по (18) средней скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0.1$ s⁻¹ свойства свинца определены как $k_0 = 8.7$ МПа, $k_d = 13$ МПа [7].

В условиях эксперимента на кривой зависимости давления РКУП от перемещения пресс-штемпеля получен участок установившегося давления. Этот результат объясняется тем, что средние значения напряжений трения в рабочем и выходном каналах равны между собой и согласно (28) давление сохраняется на постоянном уровне. Хотя очаг пластической деформации ограничен и большая часть выдавленного прутка в выходном канале находится в упругом состоянии, длина выходного канала в эксперименте оказалась такой, что среднее значение коэффициента трения в выходном канале соответствовало равенству $m_1 k_0 = m_2 k_d$.

Методом идентификации параметров модели в эксперименте выполнена оценка средних значений коэффициентов пластического трения в рабочем и выходном каналах. С использованием экспериментальных значений $p_{z_{\max}}$, k_0 , k_d средние значения коэффициентов пластического трения составляли: $m_1 = 0.82$ – в рабочем и $m_2 = 0.55$ – в выходном каналах. С использованием таких значений коэффициентов трения по (28) определены расчетные значения давления РКУП, приведенные на рис. 2. Характер зависимости расчетных значений давлений РКУП от перемещения пресс-штемпеля удовлетворительно соответствует результатам эксперимента. Снижение давления на теоретической кривой наблюдается немного раньше, чем в эксперименте. Объясняется это тем, что в начальной стадии РКУП заготовка проталкивается к нижней стенке выходного канала, в связи с чем участок стабильного в эксперименте давления, соответствующий длине выходного канала, на экспериментальной зависимости смещается вправо.

Менее крутое падение давления по расчетной кривой в сравнении с экспериментом связано с тем, что коэффициент пластического трения m_1 имеет постоянное максимальное значение, хотя в действительности потери на трение в рабочем канале уменьшаются более интенсивно со снижением высоты невыдавленной части заготовки.

Практическое значение полученных расчетных соотношений

Применение предлагаемых выражений для оценки давления РКУП с использованием коэффициентов пластического трения может быть целесообразным и полезным в ряде случаев.

На рис. 3 представлены рассчитанные по (20) соотношения коэффициентов трения в рабочем канале μ и m_1 при РКУП заготовок с относительной длиной $\bar{z} = 6$. Оценки выполнены для случая, когда угол пересечения каналов $2\Phi = 90^\circ$, а коэффициент бокового (нормального) давления на стенке канала принимается $c = 0.25-0.75$. Поскольку согласно условию Прандтля коэффициент пластического трения не может быть больше единицы, приведенные зависимости показывают область приемлемых значений коэффициентов трения μ для расчета давления прессования при РКУП по соотношениям [1]. Так, в случае РКУП менее прочных материалов, когда коэффициент c , определяющий величину нормального давления, становится большим, получают относительно высокие значения коэффициента пластического трения даже при сравнительно

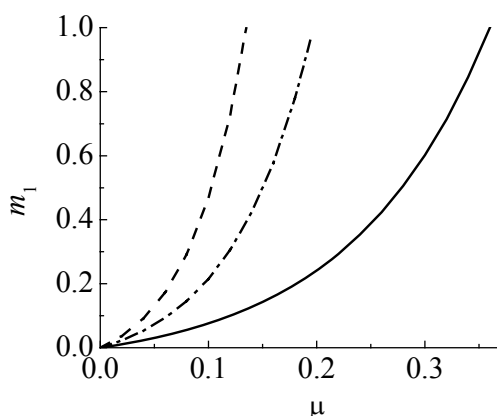


Рис. 3. Соотношение расчетных значений коэффициентов трения μ и m_1 для случая РКУП при $2\Phi = 90^\circ$, $\bar{z} = 6$, $p_0 = 0$: — $c = 0.25$, - · - · - $c = 0.5$, - - - $c = 0.75$

малых значениях μ . При $c = 0.75$ усредненное по длине рабочего канала значение коэффициента пластического трения достигает предельного значения $m_1 = 1$ уже при $\mu = 0.135$.

В [1] показано, что даже при достаточно хорошей смазке на основной длине рабочего канала закон трения оказывается близким к прандтлеву и это позволяет применять его для всех случаев горячей деформации методом РКУП. При этом весьма полезными могут быть предложенные в данной работе соотношения.

С использованием коэффициентов пластического трения проще сравнивать силовые режимы процессов прессования. Ранее [1] показано, что при эквивалентной интенсивности деформации за проход и одинаковой площади поперечного сечения обработанного материала рабочее давление, оцениваемое без учета контактного трения, в случае простого сдвига в 2–3 раза, а усилие в 5–15 раз меньше, чем при прямом прессовании. Ниже приведены результаты сравнения давления РКУП, традиционного прямого прессования (ПП) и гидроэкструзии (ГЭ) с учетом влияния контактного трения. Силовые режимы процессов сравнивались при эквивалентной пластической деформации за проход, одинаковой площади поперечного сечения и длине обработанных заготовок, равной $\bar{z} = 6$. Оценки выполнены для идеально пластичного материала. Для сравниваемых процессов принят одинаковый коэффициент трения на различных участках контакта заготовки с инструментом.

Силовой режим холодного прессования рассчитан по формуле [5]:

$$\frac{P}{k} = 4m\bar{z}_1 + \frac{m \ln R}{\sin \alpha} + \frac{2 \ln R}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} + 4m\bar{z}_2, \quad (29)$$

где $\bar{z}_1 = L/D$ – относительная длина исходной заготовки, $\bar{z}_2 = l/d$ – относительная длина пояска матрицы, R – коэффициент вытяжки.

На рис. 4 приведены расчетные значения относительного давления на пресс-штемпеле в случаях ПП, ГЭ и РКУП ($2\Phi = 90^\circ$). При этом соответствие величин коэффициентов трения обеспечивалось по (21), коэффициент нормального давления c принимался равным 0.25. При ПП $\alpha = 45^\circ$, $\bar{z}_2 = 0.5$, $R = 3.17$ относительная длина исходной заготовки увеличена на 0.2 в связи с наличием пресс-остатка $\bar{z}_1 = \frac{\bar{z}}{R\sqrt{R}} + 0.2$. Силовой режим при ГЭ оценивался по формуле (29) без учета трения заготовки о стенки контейнера, при этом $\alpha =$

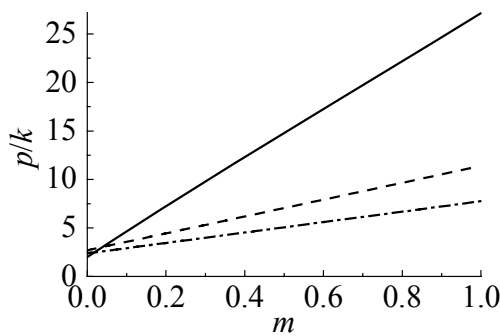


Рис. 4. Зависимости относительного давления РКУП (—), ПП (---) и ГЭ (- · - · -) от коэффициента пластического трения m

многоцикловом (5–8 циклов) РКУП давление изменяется незначительно, а методами ПП и ГЭ невозможно реализовать за один проход эквивалентные деформации (в 5–8 раз большие, чем $\ln R = 1.15$) заготовок из большинства металлов и сплавов при комнатной температуре. Как показано в [1] при многократном прессовании методами ПП и ГЭ размеры исходных заготовок, а соответственно и усилия деформирования многократно возрастают. Известно также, что в результате деформации методами ПП и ГЭ не достигается формирование равноосных субмикрочастиц с большими углами их разориентировки, как при РКУП.

Выводы

Получены выражения для оценки давления РКУП и скорости деформации заготовок с использованием коэффициентов пластического трения. Соотношения удобны для расчета максимального давления и, как показала экспериментальная проверка, обеспечивают удовлетворительное описание зависимости давления от перемещения пресс-штемпеля. Показано, что при определенных условиях реализации РКУП наблюдается продолжительная по времени стадия, в течение которой процесс протекает при стабильном максимальном уровне давления.

1. *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев*, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994), с. 44.
2. *В.З. Спусканюк, Т.Е. Константинова, А.А. Давиденко и др.*, в сб.: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, Краматорск (2007), с. 37–42.
3. *С.И. Губкин*, Теория обработки металлов давлением, Metallurgizdat, Москва (1947).
4. *С.И. Губкин*, Пластическая деформация металлов, Metallurgizdat, Москва (1960).

$= 20^\circ$, $R = 3.17$, $\bar{z}_1 = \frac{\bar{z}}{R\sqrt{R}}$. Давление

РКУП оценивалось по (17) таким образом, чтобы обеспечивалось соответствие расчетам по (19).

Видно, что при сравниваемых условиях давление РКУП больше, чем при ПП и ГЭ. Однако приведенные результаты не ставят под сомнение преимущества РКУП в накоплении пластических деформаций и формировании субмикрочастиц кристаллической структуры металлов и сплавов. При

5. И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг, Теория прессования металлов, Metallurgiya, Москва (1975).
6. Э. Зибель, Обработка металлов в пластическом состоянии, Metallurgizdat, Москва (1934).
7. В.А. Кроха, Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник, Машиностроение, Москва (1980).

V.Z. Spuskanyuk, A.N. Gangalo, A.A. Davydenko, I.M. Kovalenko

PREDICTION OF FORCE REGIME FOR THE EQUAL-CHANNEL ANGULAR EXTRUSION

Prediction method of an equal-channel angular extrusion (ECAE) force regime was proposed. Friction was appreciated with using Siebel rule. Theoretical and experimental extrusion pressure dependences on the plunger displacement are compared.

Fig. 1. Scheme for the action of forces on billet and tool under the ECAE [1]

Fig. 2. Dependence of extrusion pressure on plunger displacement: $\cdots\bullet\cdots$ – experimental curve, — – theoretical one

Fig. 3. Relationship for calculated friction coefficients μ and m_1 in case of the ECAE, $2\Phi = 90^\circ$, $\bar{z} = 6$, $p_0 = 0$: — – $c = 0.25$, $-\cdot-\cdot-$ – $c = 0.5$, $-----$ – $c = 0.75$

Fig. 4. Dependences for relative pressure of the ECAE (—), direct extrusion (----) and hydroextrusion (-·-·-) on coefficient of plastic friction m