

УДК 621. 73.06-52

Бейгельзимер Я. Е.  
Прилепо Д. В.  
Капустин В. И.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛОСКОЙ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Одной из проблем равноканальных методов интенсивной пластической деформации (ИПД) является ограничение длины обрабатываемой заготовки, в связи с потерей устойчивости штока. Такие проблемы возникают как при прямой экструзии, так и при равноканальном угловом прессовании (РКУП), винтовой экструзии (ВЭ). В некоторых процессах они преодолеваются путем применения двусторонних захватов заготовки (например, в процессе Linear Continuous Extrusion (LINEX)) [1], а также контейнеров и матриц с подвижными стенками. Последние позволяют: управлять величиной и направлением сил трения между заготовкой и инструментом; снизить мощность этих сил; разгрузить шток, благодаря переносу части деформирующей нагрузки на подвижные стенки; изменить конструкцию штока, сделать его более устойчивым и прочным. Так, например, в патенте [2] предложено следующее конструктивное решение: две боковые стороны образца окружены штоком, а нижняя сторона канала может свободно перемещаться, чтобы уменьшить трение. В работе [3] предложено другое решение: шток окружает заготовку с трёх боковых сторон, но канал не имеет нижней скользящей части. Такая конструкция уменьшает трение, а также предотвращает поршень от изгиба.

В данной работе описан еще один способ увеличения длины заготовки при ИПД. Плоская винтовая экструзия (ПВЭ) – равноканальный процесс, позволяющий деформировать заготовку в поперечном сечении по схеме простого сдвига [4]. Канал матрицы для ПВЭ имеет сложную форму, образованную двумя плоскими и двумя линейчатыми поверхностями (рис. 1).

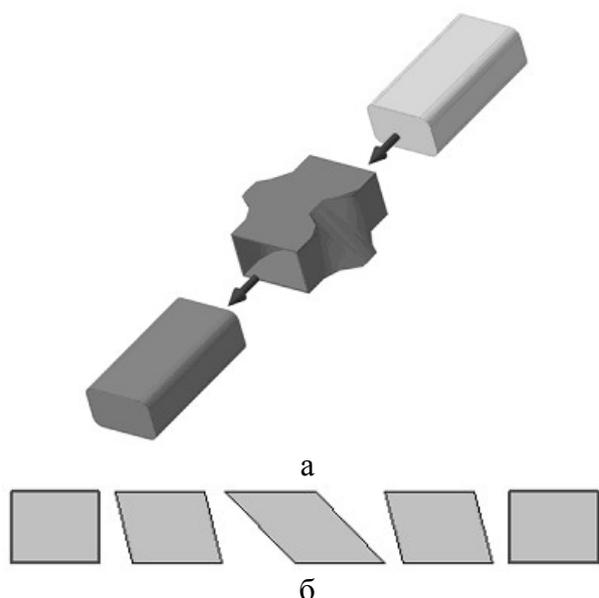


Рис. 1. Схема (а) и последовательные сечения (б) канала матрицы для ПВЭ

ПВЭ может быть реализована как с подвижными стенками, так и с неподвижными. Но основные перспективы ПВЭ связаны именно с тем, что две плоские стенки матрицы могут быть подвижными. Это позволяет реализовать ряд технических решений, повышающих устойчивость штока, увеличивающих длину заготовок и снижающих мощность сил трения. В работе [5] показана принципиальная возможность реализации процесса ПВЭ с помощью двух боковых захватов заготовки (по типу LINEX), в полунепрерывном режиме.

Главная цель статьи – сопоставление ПВЭ с подвижными и неподвижными стенками при прочих равных условиях по силовым параметрам и деформированному состоянию образцов, рассчитанных методом конечных элементов (МКЭ).

Цель численных экспериментов состояла в определении деформированного состояния заготовки при ПВЭ с подвижными стенками и сопоставлении его с деформированным

состоянием при ПВЭ с неподвижными стенками. Моделирование деформации при ПВЭ, в обеих постановках задачи, было проведено МКЭ с помощью программного обеспечения Deform-3D, позволяющего осуществить трехмерный анализ.

Винтовой канал матрицы построен путем последовательного соединения сечений. Начальным и конечным сечениями канала матрицы являются квадраты со стороной 10 мм. Сначала квадратное сечение плавно переходит в параллелограмм с острым углом  $45^\circ$ , а затем этот параллелограмм плавно переходит к конечному квадрату. Все элементы матрицы были смоделированы как жесткие элементы.

В расчете использовали тетраэдрические конечные элементы. Заготовка состояла из 30000 элементов. Размер заготовки  $10 \times 10 \times 100$  мм<sup>3</sup>. Тип объекта – пластический. В качестве материала заготовки выбран алюминиевый сплав 5083 (аналог АМгб). При моделировании была использована автоматическая перестройка сетки, а так же условие непроницаемости инструмента. Все расчеты проводились для скорости рабочего штока 3 мм/с. Противодействие осуществлялось благодаря второму штоку, который расположили вплотную к переднему торцу образца. Второму штоку также была задана скорость 3 мм/с. Температура процесса при моделировании 20 °С.

В качестве условия пластичности использовали соотношение  $\sigma_i = \sigma_s$  из теории пластического течения несжимаемых сред Леви-Мизеса. Реологическая кривая течения была взята из базы Deform-3D для данного материала.

В процессе ПВЭ, при противодействии порядка величины напряжения течения деформируемого металла, его давление на стенку матрицы настолько велико, что вступает в силу закон пластического трения. Поэтому, в расчете МКЭ трение заготовки о стенки матрицы задавали законом Зибеля  $\tau = \mu \sigma_s$ , с коэффициентом трения  $\mu = 0,25$  [6].

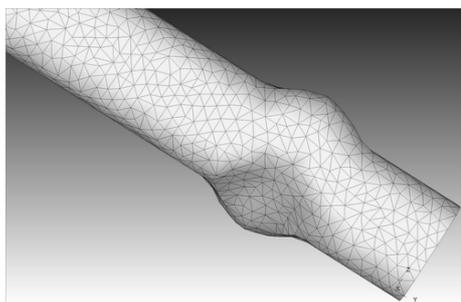


Рис. 2. Заготовка в очаге деформации

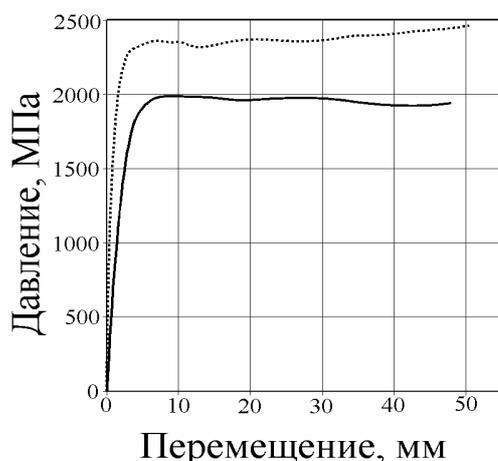


Рис. 3. Зависимость давления экструзии от перемещения инструмента:

- - - ПВЭ с неподвижными стенками;  
 — с подвижными

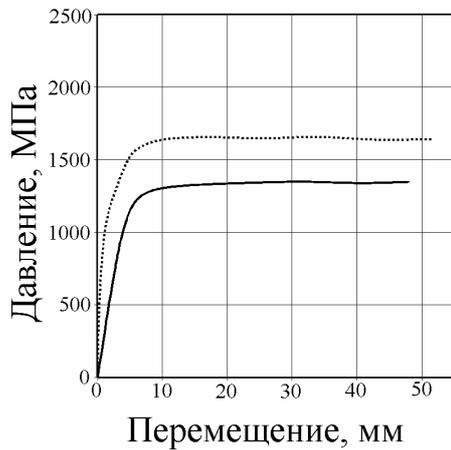
Для определения компонент тензоров напряжений и деформаций и отслеживания движения частиц в металле разместили 3 маркера (2 в углах заготовки и 1 на оси).

Расчет остановили в тот момент, когда в очаге деформации состоялся установившийся процесс (рис. 2).

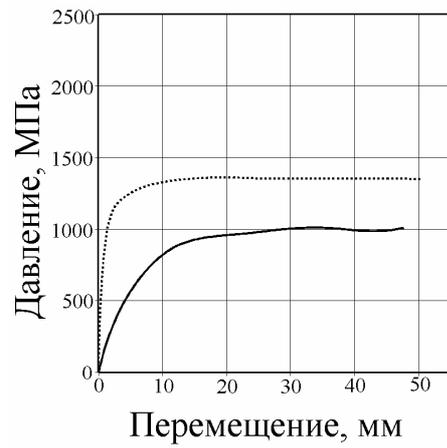
На рис. 3 показаны расчетные значения давления прессования для ПВЭ с неподвижными и подвижными стенками матрицы.

Из рис. 3 видно, что расчетное значение давления ПВЭ с подвижными стенками меньше, чем ПВЭ с неподвижными, при одной и той же силе противодействия. Это обусловлено, прежде всего, меньшими затратами на трение для первого случая из-за подвижности стенок матрицы.

В результате пластической деформации заготовки в канале матрицы возникают нормальные давления на стенки, причем, на линейчатых поверхностях удельные давления выше для обоих случаев (рис. 4). Величина нормальных давлений в случае с подвижными стенками примерно на 20 % ниже.



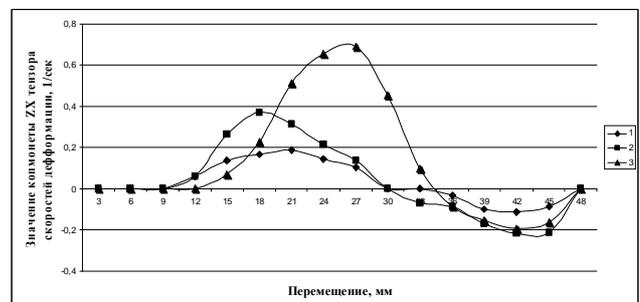
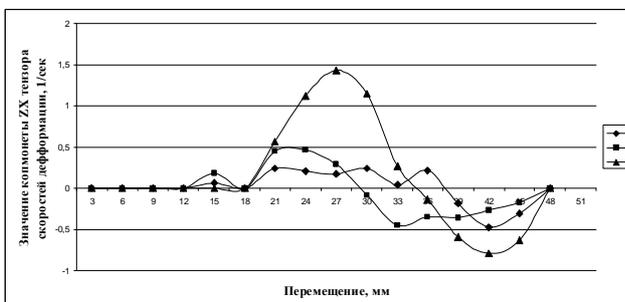
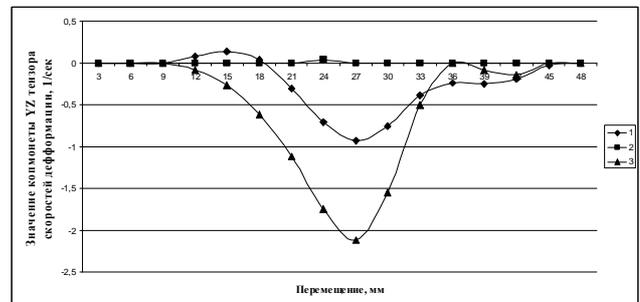
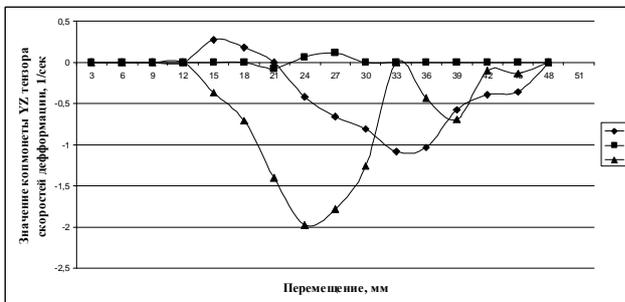
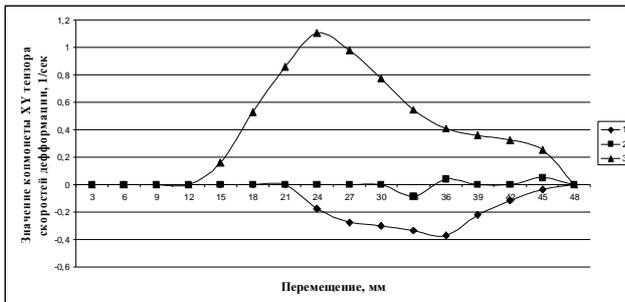
а



б

Рис. 4. Зависимость распирающих напряжений на стенках с линейчатой поверхностью (а) и на гладких стенках (б) от перемещения заготовки

На рис. 5 представлены расчетные графики зависимости компонент тензора скорости деформации от координаты вдоль оси экструзии.



а

б

Рис. 5. Расчетные графики зависимости компонент тензора скорости деформации от координаты вдоль оси экструзии:

а – ПВЭ с неподвижными стенками; б – ПВЭ с подвижными стенками (здесь и ниже – точка 1 располагается в «остром» углу сечения; точка 2 – на оси заготовки; точка 3 – в «тупом» углу сечения)

Как и ожидалось, компоненты тензора скорости деформации для обоих случаев ПВЭ оказались сходными.

Расчетная зависимость деформации Мизеса, в трёх характерных точках сечения заготовки, от перемещения вдоль оси экструзии, представлена на рис. 6.

Из графика накопленной деформации видно, что деформация распределена неравномерно. В центре сечения образца деформация меньше чем на периферии; но при этом в центре образца удалось накопить деформацию порядка 1,5 за один проход, что показывает хорошую прорабатываемость материала по сечению.

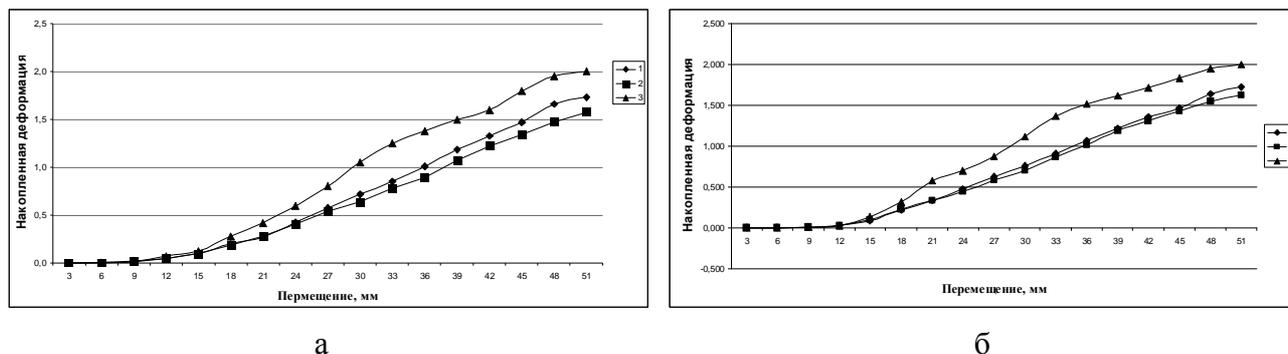


Рис. 6. Расчетная зависимость деформации Мизеса в трёх характерных точках сечения заготовки от координаты вдоль оси экструзии:

а – ПВЭ с неподвижными стенками; б – ПВЭ с подвижными стенками

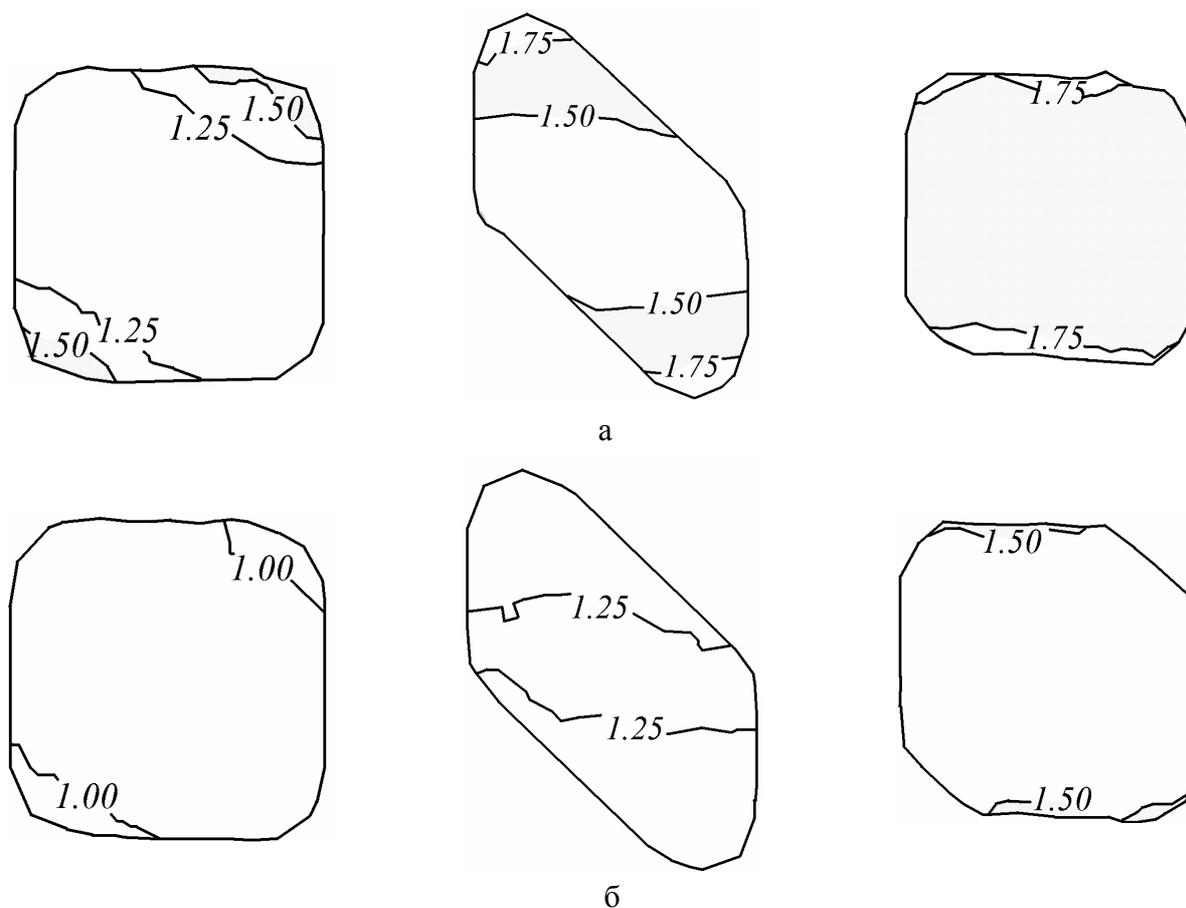


Рис. 7. Изолинии распределения деформации по сечению образца на нескольких участках винтового канала:

а – ПВЭ с неподвижными стенками; б – ПВЭ с подвижными стенками

На рис. 7 представлены расчетные поля распределения деформации Мизеса по сечению заготовок после ПВЭ.

Рис. 7 показывает одинаковый характер распределения деформации по сечениям заготовок для обоих случаев ПВЭ. Различие состоит лишь в уровне накопленной деформации. Большая величина накопленной деформации в случае с неподвижными стенками матрицы объясняется большей депланацией сечений заготовки в результате трения.

### ВЫВОДЫ

Давление прессования при ПВЭ в случае с подвижными стенками ниже, примерно на 20 %, чем в случае с неподвижными, при одной и той же силе противодействия. Нормальные давления на линейчатых поверхностях для обоих случаев выше, чем на плоских. Компоненты тензора скорости деформации для обоих случаев ПВЭ сходны.

Деформация по сечениям распределена неравномерно, в центре сечения образца деформация меньше, чем на периферии; но при этом в центре образца удалось накопить деформацию порядка 1,5 за один проход, что показывает хорошую прорабатываемость материала по сечению.

Расчет показывает одинаковый характер распределения деформации по сечениям заготовок для обоих случаев ПВЭ. Различие состоит лишь в уровне накопленной деформации. Большая величина накопленной деформации в случае с неподвижными стенками матрицы объясняется большей депланацией сечений заготовки в результате трения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Black J. T. *Theory of linear continuous extrusion LINEX*. American Society of Mechanical Engineers (Paper) / J. T. Black, W. G. Voorhees. – Issue 77 -WA/PROD-17, 1977. – 6 p.
2. US patent No. 5,513,512 / Segal V.M., 1996.
3. Mathieu J.-P., Suwas S., Eberhardt A., Toth L.S., Moll P // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – № 173. – P. 29–33.
4. Beygelzimer Y., Prilepo D., Kulagin R., Grishaev V., Abramova O., Varyukhin V., Kulakov M. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – № 211. – P. 522–529.
5. Beygelzimer Y., Prilepo D., Synkov S. // *Semicontinuous twist extrusion. Fiz. Tekh. Vys. Davl. (High Pressure Physics and Technology, in Russian)*. – 2007. – № 17 (2). – P. 100–104.
6. Levanov A. N., Kolmogorov V. L., Burkin S. P., Kartak B. R., Ashpur U. V., Spasskiy U. I. // *Contact friction in metal forming processes*. – M. : Metallurgy [In Russian], 1976.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф. ДонФТИ НАН Украины;

Прилепо Д. В. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины;

Капустин В. И. – студент ДонНТУ.

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: [prilepo@fti.dn.ua](mailto:prilepo@fti.dn.ua)