

Бейгельзимер Я.Е., Решетов А.В., Сынков С.Г., Орлов Д.В., (Донецк, ДонФТИ),  
Кулагин Р.Ю., Кулаков Н.С. (Донецк, ДонНТУ)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

*Предложен и реализован экспериментально-расчетный метод определения деформированного состояния металла при винтовой экструзии. Суть метода в том, что при обработке эксперимента используется информация о принадлежности поля скоростей течения металла к классу кинематически-возможных полей. Последний удовлетворяет условию несжимаемости и граничным условиям в скоростях. Мы определяем поле  $\vec{V}$  из указанного класса, наиболее близко приближающее эксперимент по линиям тока металла. Это поле мы считаем экспериментальным и далее уже на его основе определяем скорости деформаций и эквивалентную деформацию. Предложенный метод позволяет избежать двукратного дифференцирования экспериментальных данных, заменив его дифференцированием аналитического выражения для  $\vec{V}$ .*

*Experimental-calculation method of strained state definition of a billet at twist extrusion was proposed and realized. The essence of the method is a using of information on complying of a field of metal flow velocities with a class of kinematically-admissible fields. This information is used for a data of experiments handling. This class of velocities complies with condition on incompressibility and boundary conditions in velocities. We define field  $\vec{V}$  from the class mentioned, as a closest to experimental lines of metal flow. We consider this field as experimental and the strain rates and equivalent deformation are calculated based on this. The method proposed allows to avoid double differentiation of the experimental data by means of analytic form for  $\vec{V}$  differentiation.*

### Введение

В конечном счете, любой метод решения задач ОМД является экспериментально-расчетным в том смысле, что на основе некоторых экспериментов позволяет, путем расчета, найти характеристики процесса. Различные методы отличаются необходимой для них экспериментальной информацией. В некоторых случаях это лишь кривая течения металла и коэффициент трения. Такие методы принято относить к расчетным [1,2]. В других, расчет производится на основе экспериментально определенного массива координат искаженной сетки, введенной в образец до деформации. Такие методы собственно и относят к экспериментально-расчетным [3,4].

На первый взгляд может показаться, что чем больше экспериментальной информации об исследуемом процессе будет использовано, тем точнее получится результат. Однако это не всегда так. Обусловлено это рядом факторов. Во первых, экспериментальная информация содержит естественную, неустранимую погрешность, объем которой возрастает с увеличением самой информации. Во вторых, обработка эксперимента (например, дифференцирование, особенно многократное) вносит существенные искажения. В третьих, для получения большего объема информации необходимо более существенно вмешиваться в эксперимент, что начинает уже влиять на его исход. Например, введение большого числа меток-волокон в заготовку приводит к изменению ее напряженно-деформированного состояния.

Указанная проблема заставляет искать оптимум по объему экспериментальной информации и разрабатывать новые методы.

В настоящей работе предлагается один из таких методов.

### Идея предлагаемого метода

Суть нашего подхода в том, что при обработке эксперимента мы используем информацию о принадлежности поля скоростей течения металла к классу кинематически-возможных полей. Последний удовлетворяет условию несжимаемости и граничным условиям в скоростях. Мы определяем поле  $\vec{V}$  из указанного класса, наиболее близко приближающее эксперимент по линиям тока металла. Это поле мы считаем экспериментальным и далее уже на его основе определяем скорости деформаций и эквивалентную деформацию. При

этом мы уходим от двукратного дифференцирования экспериментальных данных, заменяя его дифференцированием аналитического выражения для  $\vec{V}$ .

Конечно, чудес не бывает. Погрешности, вносимые двукратным дифференцированием экспериментальной информации, мы заменяем погрешностью обусловленной подменой экспериментальных линий тока теоретическими. Однако, с нашей точки зрения, в некоторых случаях это дает выигрыш в точности определения характеристик деформации.

К таким случаям относится процесс винтовой экструзии, предложенный первым автором несколько лет назад [5] и в последующем развиваемый всем авторским коллективом [6-8].

Винтовая экструзия относится к процессам, которые сейчас принято объединять под общим названием ИПД - процессы интенсивной пластической деформации. Они предназначены для формирования в материалах ультрамелкокристаллической структуры, которая обеспечивает им уникальные свойства [9, 8].

#### *Схема винтовой экструзии*

Основная идея ВЭ состоит в том, что призматическую заготовку пропускают через винтовую матрицу (рис. 1).

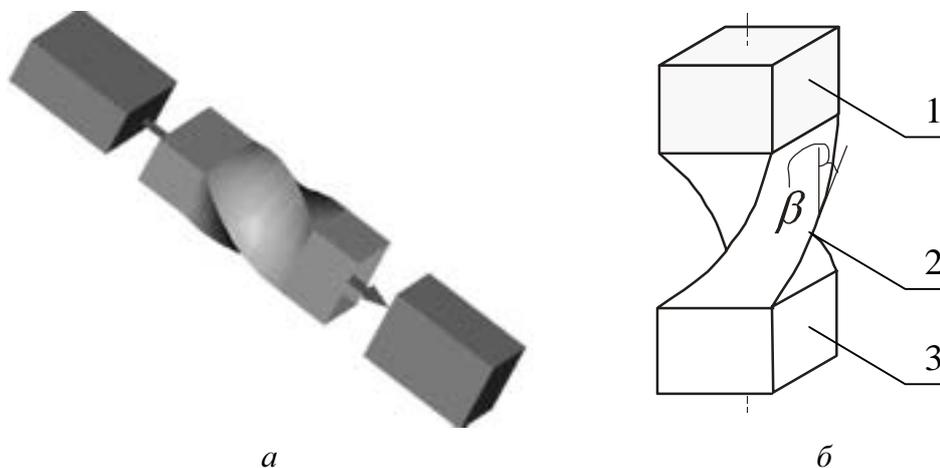


Рис.1 – Схема, поясняющая суть винтовой экструзии: *а* – схема прохождения заготовки через винтовую матрицу; *б* – схема канала винтовой матрицы

Канал матрицы состоит из трех участков: заходного 1, винтового 2 и калибрующего 3. Поперечные сечения всех участков одинаковы, поэтому форма заготовки после экструзии практически такая же, как и до нее. При прохождении через матрицу заготовка испытывает интенсивную деформацию. Подвергая заготовку многократной экструзии (а это возможно именно потому, что форма экструдированной заготовки такая же, как исходной) можно накапливать в металле большие деформации, существенно изменяя его структуру.

Выполненные нами исследования показали, что деформация металла при ВЭ осуществляется в основном на входе и выходе из винтового участка канала матрицы [8]. Величина эквивалентной деформации за один проход зависит, в основном, от угла  $\beta$  (см.рис. 1б) и для характерных значений этого угла ( $50^\circ$ - $60^\circ$ ), в среднем по сечению заготовки, составляет 1.0-1.2.

#### *Проблемы с определением напряженно-деформированного состояния металла при ВЭ*

Одной из важнейших задач при проектировании технологии винтовой экструзии (ВЭ) является определение напряженно-деформированного состояния металла по объему заготовки. В работе [8], вариационным методом, мы получили теоретические оценки для указанных характеристик в первом приближении.

Более точные расчеты можно было бы выполнить методом конечного элемента, если бы не проблемы, связанные с незнанием реологии металла и условий контактного трения.

Наше незнание реологии обусловлено тем, что при ВЭ металл испытывает большие, существенно немонотонные, деформации. Что же касается трения, то, помимо неизвестной реологии металла, его определение осложняется значительным по величине, немонотонным изменением поверхности заготовки при экструзии.

Определение напряженно-деформированного состояния металла при ВЭ традиционными экспериментально-расчетными методами также затруднено. Как правило, они предназначены для плоских или осесимметричных задач, а при ВЭ деформация металла существенно трехмерная. Известные же нам методы, основанные на определении искажения пространственных сеток, требуют такой конструкции заготовки, которая существенно влияет на ее напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при ВЭ.

По указанной причине мы разработали для ВЭ метод, идея которого описана выше.

*Методика проведения эксперимента*

Для проведения эксперимента использовали призматические заготовки размерами 17,5\*27,5\*60 мм из меди марки М1. Сечение образца приведено на рис. 2.

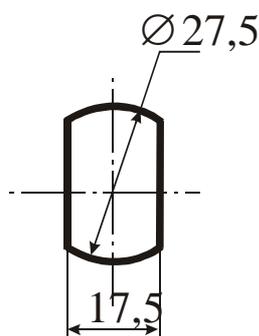


Рис.2 – Поперечное сечение образца для винтовой экструзии

Параллельно оси образца фиксировалась координатная сетка. Координатная сетка создавалась следующим образом:

1. на прецизионном сверлильном станке в медной заготовке просверливали отверстия диаметром 1,2 мм. Отверстия сверлились параллельно продольной оси заготовки на глубину 50 мм. Заготовка имела круглое поперечное сечение диаметром 29 мм;
2. в просверленные отверстия вставлялась алюминиевая проволока диаметром 1 мм;
3. медную заготовку с алюминиевыми метками редуцировали с диаметра 29 мм до диаметра 27,5 мм. Полученное заготовкой небольшое обжатие зафиксировало алюминиевые метки в теле образца;
4. была выполнена фрезеровка боковых поверхностей заготовки до необходимых для процесса винтовой экструзии размеров поперечного сечения – 17,5\*27,5 мм.

Каждому волокну в теле заготовки присваивался индивидуальный номер. Всего в заготовку было введено 9 алюминиевых волокон.

Экструзия медной заготовки с алюминиевыми волокнами осуществлялось при комнатной температуре и противодействии 10 т. Использовалась винтовая матрица с углом наклона винтовой линии  $60^{\circ}$  и высотой винтовой части 17мм. После того, как образец заполнил всю винтовую часть матрицы, а также ее калибрующий участок, процесс прессования был остановлен. Установку для ВЭ разобрали и произвели выпрессовку винтовой матрицы с заготовкой из бандажа. После этого винтовая матрица разбиралась и из нее извлекалась заготовка.

Исходную информацию получали в плоскостях реза  $z = const$  (перпендикулярно продольной оси) по следам меток на поверхности образца.

Вскрытие меток осуществлялась с шагом 1 мм путем шлифовки торца заготовки на плоскошлифовальном станке. Для того чтобы строго вертикально фиксировать заготовку на столе станка, она помещалась в металлическую тонкостенную трубу и заливалась в ней

сплавом Вуда. Продольная ось образца при этом совпадала с продольной осью трубы. Таким образом, образец в трубе фиксировался на плоскошлифовальном станке, где каждый раз с торца снимался слой толщиной  $1 \pm 0.01$  мм. Для выявления меток производилось травление торцевой поверхности образца в 50%-ом растворе азотной кислоты.

На рис. 3 представлены полученные таким образом картины меток в торцевых сечениях образца.

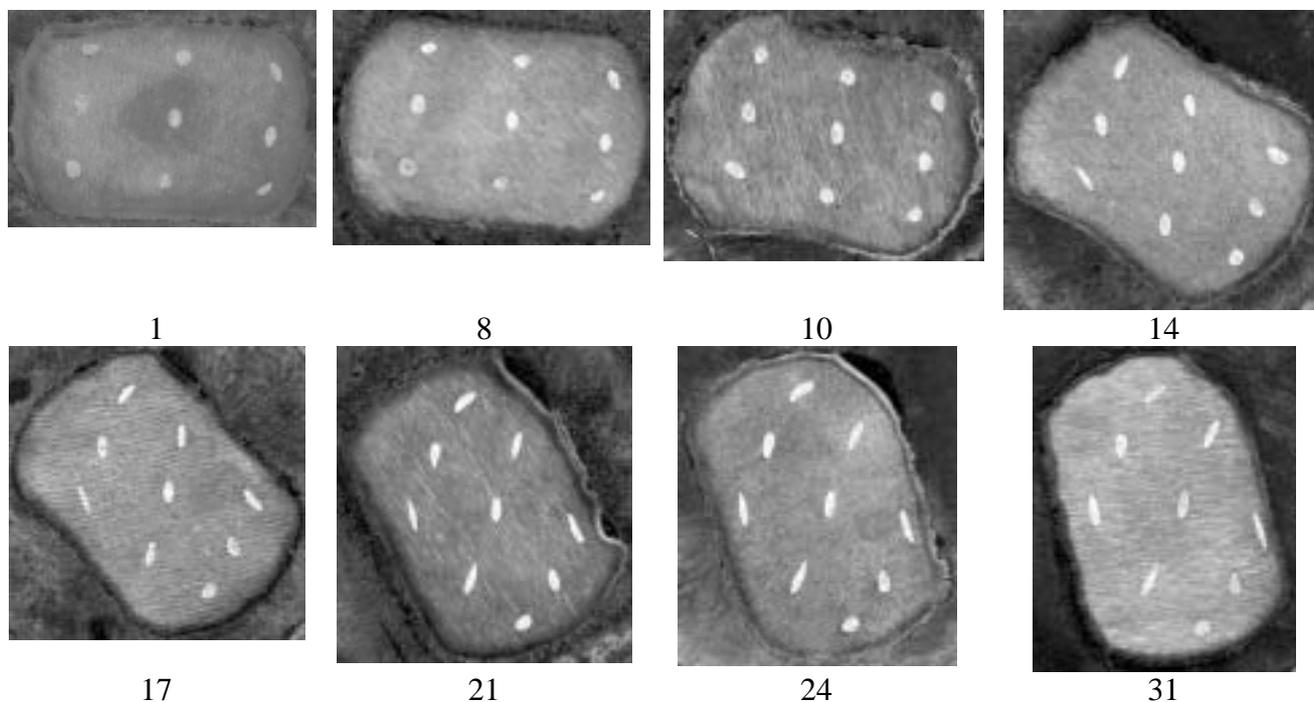


Рис. 3 – Поперечные сечения (№1,8,10,14,17,21,24,31) образца со следами меток

Затем снимались и записывались координаты  $x, y$  каждой метки для данного сечения  $z$ . Для этого сошлифованная торцевая поверхность заготовки оцифровывалась при помощи сканирующего устройства, в пакете AutoCAD определялся центр масс каждой деформированной метки и записывались его координаты.

Таким образом, была получена информация с 35-ти поперечных сечений заготовки, и восстановлены траектории течения материала 9-ти характерных точек образца.

#### *Методика построения поля скоростей при ВЭ*

Для моделирования процесса винтовой экструзии в среде MathCad была составлена специальная компьютерная программа. Построено кинематически-возможное поле скоростей, компоненты которого имеют следующий вид [8]:

$$V_x = \frac{\partial(\omega P)}{\partial y} - \frac{yV_0 \operatorname{tg} \beta}{R}, \quad V_y = -\frac{\partial(\omega P)}{\partial x} + \frac{xV_0 \operatorname{tg} \beta}{R}, \quad V_z = V_0$$

где  $\omega$  - так называемая функция формы канала, удовлетворяющая следующим условиям: на стенках канала  $\omega = 0$ , внутри канала  $\omega > 0$ , вне канала  $\omega < 0$ ;

$P$  - произвольная функция;

$V_0$  - скорость прессования;

$\beta$  - угол наклона винтовой линии к направлению оси экструзии;

$R$  - радиус канала матрицы.

Варьируемой в поле скоростей является функция  $P$ , причем в данной работе предположено, что  $P$  является функцией только от  $z$  и имеет характер, показанный на рис. 4.

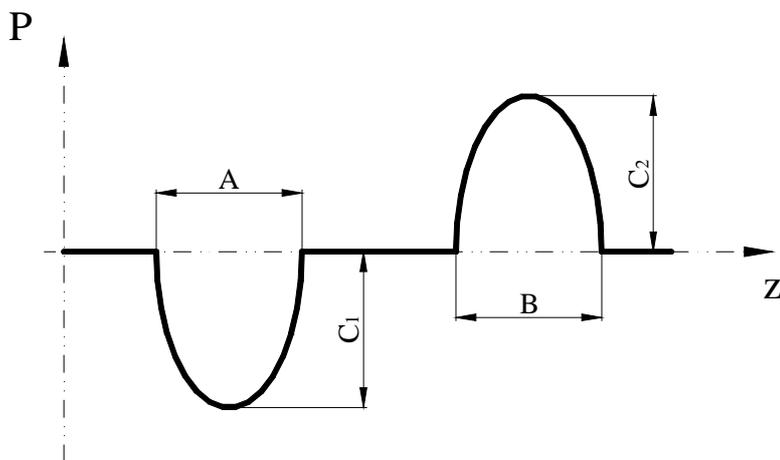


Рис. 4 – Скелет функции  $P(z)$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $C_1$  и  $C_2$  – варьируемые параметры

Такой характер этой функции обоснован в работе [8].

По координатам меток, полученным в результате проведения эксперимента, и координатам, рассчитанным с помощью вышеописанного поля, определяли суммарную невязку, представляющую собой сумму квадратов расстояний теоретических меток от экспериментальных.

Варьируемые параметры  $A$ ,  $B$ ,  $C_1$  и  $C_2$  определялись путем минимизации невязки, с помощью специальной функции Minimize пакета MathCad.

#### *Результаты обработки*

Для условий эксперимента значения параметров получились следующими:

$A = 13,5$ ;  $B = 0,7$ ;  $C_1 = -1,8$ ;  $C_2 = 2$ .

При этих значениях параметров функция  $P(z)$  имеет вид представленный на рис. 5.

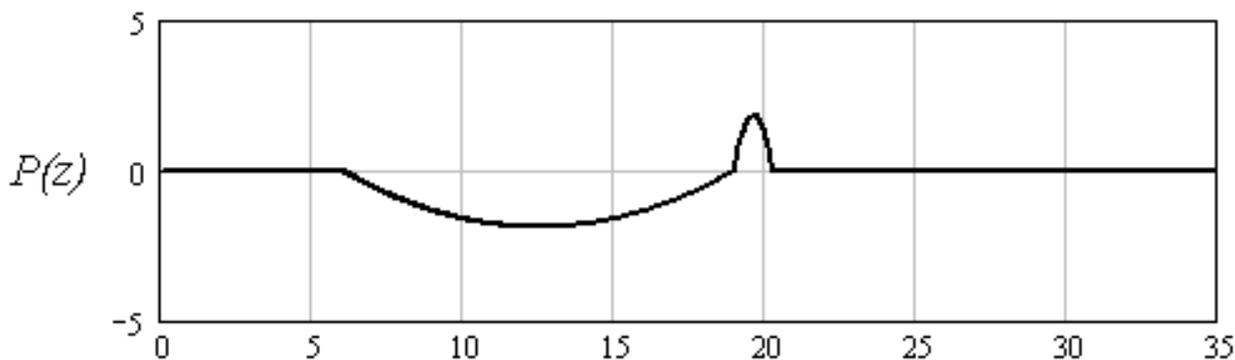


Рис. 5 – Функция  $P(z)$  для условий эксперимента

На рис. 6 приведены последовательные положения двух характерных точек 1 и 2, полученные непосредственно в эксперименте и после обработки по предложенному методу.

С нашей точки зрения соответствие вполне удовлетворительное. Некоторое расхождение экспериментально определенных и рассчитанных координат точки 2 заготовки, по-видимому, объясняется тем, что плоское кинематически-возможное поле скоростей не позволяет учитывать происходящую при ВЭ депланацию поперечных сечений.

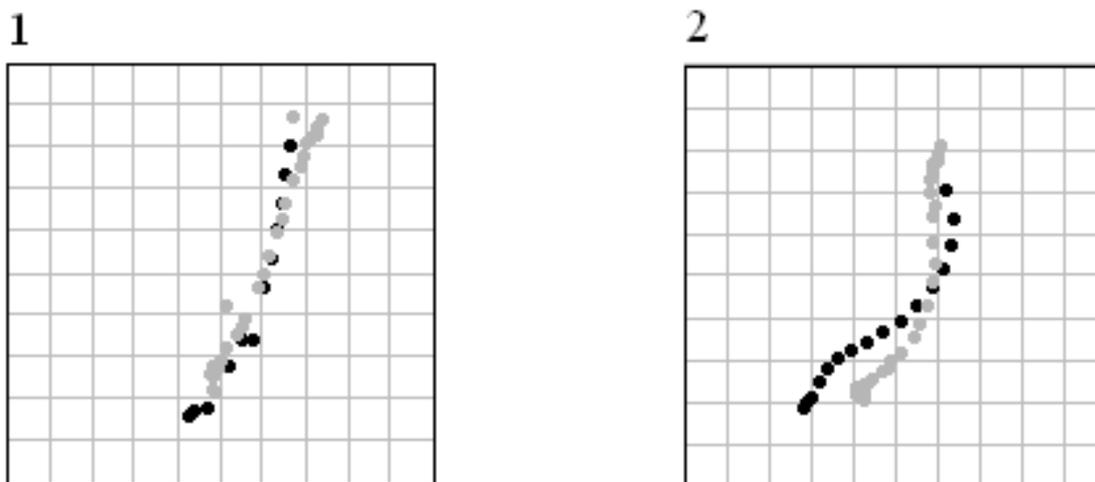


Рис. 6 – Последовательное положение меток: *черный* – расчет предлагаемым методом, *серый* - эксперимент

В последующем мы предполагаем получить лучшее приближение для точки 2, применив более гибкий класс кинематически-возможных полей из работы [8].

#### Выводы

1. Из полученных экспериментально данных видно, что метки движутся по винтовой траектории с некоторым отставанием от винтового движения контура поперечного сечения заготовки, т.е. наблюдается перетекание металла в плоскости сечения. Это подтверждает высказанное ранее предположение о двойственном характере течения материала при ВЭ;
2. Полученное экспериментально-расчетным методом поле скоростей при ВЭ дает результаты довольно близкие к экспериментальным данным по координатам меток;
3. Некоторое расхождение экспериментально определенных и рассчитанных координат точек заготовки по-видимому объясняется тем, что плоское кинематически-возможное поле скоростей не позволяет учитывать происходящую при ВЭ депланацию поперечных сечений. В дальнейшей работе авторы предполагают использовать более общие уравнения поля скоростей, не включающие в себя гипотезу плоских сечений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. – М.: Машиностроение, 1979. – 567с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ.: под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Воронцов В.К., Полухин П.И., Белевитин В.А., Бринза В.В. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел. – М.: “Металлургия”, 1990, 480 с.
4. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л., “Машиностроение”, 1972, 360 с.
5. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Сынков С.Г. и др. // Физика и техника высоких давлений.-1999.- т.9.- №3, с.109.
6. Бейгельзимер Я.Е., Сынков С.Г., Орлов Д.В., Решетов А.В. Винтовая экструзия // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004, №6. - с. 15-22.
7. Beygelzimer Y., Orlov D. and Varyukhin V. A new severe plastic deformation method: Twist Extrusion // Ultrafine Grained Materials II; Ed. By Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, M.J. Saran, T.C. Lowe. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).– 2002.– P.297–304.
8. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Донецк: ТЕАН, 2003 г. – 85 с.
9. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. -М.: Логос, 2000.-271 с.