

PACS: 62.20.Fe

Р.Ю. Кулагин

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина  
E-mail: rkulagin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12 июля 2010 года

*Предложен новый подход к разработке технологии винтовой экструзии (ВЭ), учитывающий специфику процесса. Подход базируется на расчете критериев – основных характеристик процесса. Показано, что критериями ВЭ являются минимальная накопленная деформация за один проход, распределение накопленной деформации по поперечному сечению заготовки и давление экструзии. Для них в работе получены инженерные соотношения. Эффективность подхода подтверждена стабильной работой оснастки в опытно-промышленных условиях.*

**Ключевые слова:** винтовая экструзия, накопленная деформация, давление, простой сдвиг, фрагментация

### 1. Введение

Винтовая экструзия является методом обработки металлов давлением, предназначенным для преобразования структуры материалов [1,2]. Разработка технологии ВЭ, в отличие от подготовки производства методом прямой экструзии, имеет целый ряд особенностей, обусловленных следующими тремя причинами. Во-первых, эти два вида экструзии отличаются задачами, которые ставятся перед ними. Если основная цель прямой экструзии состоит в получении заданного профиля, то ВЭ предназначена для формирования субмикроструктурных структур и гомогенизации сплавов. Во-вторых, при ВЭ схема деформации близка к простому сдвигу, а при прямой экструзии – к одноосному удлинению. В настоящее время показано, что деформация по схеме простого сдвига имеет ряд особенностей, вплоть до изменения механизма деформации [3,4]. Изменения структуры и свойств металлов при ВЭ пока изучены слабо, что обуславливает необходимость дополнительных экспериментов при разработке ее технологии. В-третьих, при ВЭ, в отличие от прямой экструзии, возникают мощные силовые моменты, замыкающиеся в оснастке, учет которых необходим при расчете инструмента на прочность.

Цель настоящей работы – вскрыть особенности этапа проектирования ВЭ и разработать новый подход, повышающий эффективность работы технолога на данном этапе.

### 1. Задачи разработки технологии и предлагаемый подход к проектированию ВЭ

Важнейшие задачи разработки технологии ВЭ – расчет калибровки штамповой оснастки и энергосиловых параметров экструзии, определение накопленной деформации и температурно-скоростного режима деформирования, обеспечивающих формирование заданных структур и свойств металла.

Указанные параметры определяются на основе удовлетворения основных целей, поставленных перед обработкой методом ВЭ, – обеспечения необходимого уровня и равномерности распределения механических свойств, надежной и стабильной работы штамповой оснастки и т.д. Задачи проектирования изменяются в соответствии с поставленными целями и ограничениями, поэтому мы используем подход многокритериальной оптимизации Соболя–Статникова [5] для назначения технологических параметров ВЭ. В основе подхода лежит расчет критериев оптимизации – важнейших переменных, характеризующих процесс. По нашему мнению, для ВЭ такими критериями являются основные характеристики процесса: минимальная деформация, накапливаемая заготовкой за один проход  $e_{\min}$ , неравномерность распределения накопленной деформации по поперечному сечению заготовки  $k_e$  и максимальное давление экструзии  $p_{\max}$ . Обоснуем это утверждение.

В работе [6] показано, что существенное влияние на фрагментацию зерен деформируемого материала оказывает цикличность деформации. При амплитуде деформации, меньшей некоторой величины, фрагментация не происходит. Поэтому важным критерием является минимальная деформация, накапливаемая заготовкой за один проход.

При обработке методом ВЭ накапливаемая металлом деформация неоднородна по поперечному сечению заготовки. В большинстве случаев заказчику необходимо равномерное распределение механических свойств по объему заготовки. Для характеристики равномерности распределения накопленной деформации предлагается использовать критерий, предложенный в [7]:

$$k_e = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{\text{mean}})^2}{n-1}}}{e_{\text{mean}}}, \quad (1)$$

где  $e_{\text{mean}}$  – средняя накопленная деформация по поперечному сечению заготовки.

Величина давления важна при выборе прессы, а также при расчете инструмента на прочность. Для оценки давления использовали величину средней деформации  $e_{\text{mean}}$ , которую принимали в качестве критерия оптимизации.

## 2. Результаты исследований, составляющие научную основу разработки технологии ВЭ

Исследования показали, что деформированное состояние металла при ВЭ, в отличие от прямой экструзии, существенно зависит от его реологии и условий трения. Это обстоятельство требует корректировки деформированного состояния, полученного на модельных материалах, при использовании его в расчетах ВЭ. По этой же причине при расчете ВЭ нельзя применять кривые упрочнения, полученные в стандартных механических испытаниях. Таким образом, при разработке технологии ВЭ необходимо проводить предварительные исследования с реальным материалом.

Объем этих исследований может быть существенно сокращен путем использования RVA модели [6], описывающей поведение материала в схемах, близких к простому сдвигу. Нами разработаны методы идентификации модели в специальных экспериментах.

В ходе исследований установлено, что применение модели идеального жесткопластического тела при расчетах критериев ВЭ позволяет найти оценки величин неравномерности деформации, силовых параметров, а также минимальной деформации, накопленной заготовкой. На этой основе получены инженерные формулы для расчета важнейших показателей ВЭ.

Расчет инструмента для прямой экструзии, как правило, базируется на формулах Лямэ, предназначенных для расчета толстостенных цилиндров [8]. Из-за наличия мощных силовых моментов этот подход не применим для расчета инструмента ВЭ. Нами получены соотношения для распределения контактных давлений (учитывающие силовые моменты), которые являются исходными данными для расчета инструмента на прочность в пакетах метода конечных элементов.

## 3. Влияние реологии на кинематику течения при ВЭ

Изучение влияния реологии на деформированное состояние металла при ВЭ выполнено с помощью метода конечных элементов в пакете Deform-3D. Отметим, что под реологией в данной работе подразумевается кривая напряжение–деформация, которая аппроксимируется линейной зависимостью

$$\sigma = \sigma_0 (1 + Ae), \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – предел текучести материала;  $A$  – коэффициент деформационного упрочнения,  $A = 0$  и  $1.0$ .

Закон пластического трения был принят в виде  $\tau = \mu\sigma$ , где  $\mu$  – коэффициент трения. Согласно работе [9]  $\mu = 0.27$ . Канал винтовой матрицы имел размеры поперечного сечения  $18 \times 28$  mm, шаг винтовой линии – 64 mm, длина винтового участка – 16 mm.

На рис. 1 показано распределение накопленных деформаций по поперечному сечению заготовки из идеального жесткопластического материала ( $A = 0$ ) и деформационно-упрочняемого ( $A = 1.0$ ). Значения основных деформационных критериев ВЭ представлены в табл. 1.

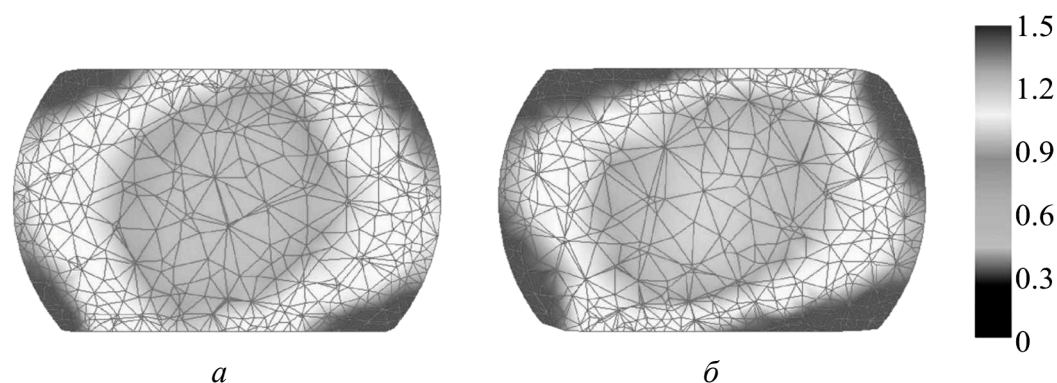


Рис. 1. Распределение накопленных деформаций по поперечному сечению заготовки при разных значениях коэффициента деформационного упрочнения  $A$ :  $a - 0$ ,  $b - 1.0$

Таблица 1

Значения основных деформационных критериев ВЭ (расчет)

Коэффициент $A$	$\epsilon_{\min}$	$k_e$	$\epsilon_{\text{mean}}$
0	0.61	0.30	1.08
1.0	0.67	0.24	1.00

Из рис. 1 следует, что коэффициент деформационного упрочнения достаточно сильно влияет на деформированное состояние заготовки. Материал с упрочнением дает большую деформацию в центральной области в отличие от материала с реологией идеального жесткопластического тела. Для некоторых точек поперечного сечения различие в величине накопленной деформации достигает почти 50%.

Данные табл. 1 свидетельствуют, что величины минимальной и средней деформации гораздо меньше (не более 10%) зависят от коэффициента упрочнения, а коэффициент однородности более чувствителен к изменению реологии. Расчет на основе соотношений для идеального жесткопластического материала позволяет по поперечному сечению заготовки получить инженерные оценки минимальной деформации, неравномерности распределения деформации и средней деформации, накапливаемой за один проход ВЭ.

Экспериментальное исследование влияния реологии на кинематику течения металла при деформации ВЭ выполнено экспериментально-расчетным методом (ЭРМ) [10]. Для исследований были выбраны титан ВТ1-0, медь М1 и алюминиевый сплав системы Al-Mg-Sc. Выбор материалов обусловлен перспективностью их применения. Согласно ЭРМ заготовки с метками были продеформированы в винтовой матрице при следующих условиях. Температура деформации титана составляла 400°C, алюминия и меди – 300°C. В эксперименте использовали винтовую матрицу с теми же размерами, что и при численном моделировании. В качестве смазки для титановой заготовки применяли смесь на основе стекла, для медной и алюминиевой – тефлон.

В табл. 2, 3 представлены результаты экспериментального исследования влияния реологии и условий трения на деформационные характеристики ВЭ, которые подтверждают выводы, сделанные выше на основе численного эксперимента.

Таблица 2

Положение меток в поперечном сечении заготовок до и после деформации ВЭ

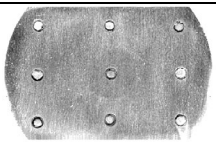
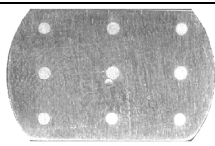
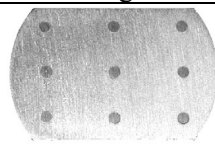

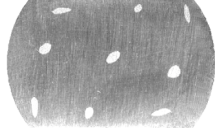

Положение меток	BT1-0	M1	Al-Mg-Sc
До деформации			
После деформации			

Таблица 3

Значения основных деформационных критериев ВЭ (эксперимент)

Материал	$e_{\min}$	$k_e$	$e_{\text{mean}}$
BT1-0	0.65	0.33	1.12
M1	0.61	0.31	1.04
Al-Mg-Sc	0.58	0.28	1.00

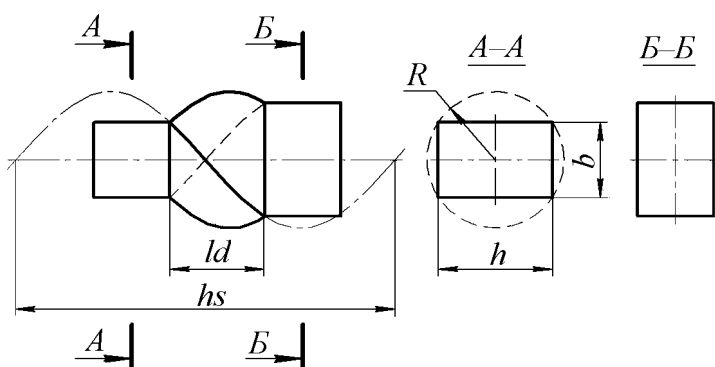


Рис. 2. Схема очага деформации ВЭ

#### 4. Соотношения для важнейших показателей ВЭ

С целью получения соотношений для расчета критериев  $e_{\min}$ ,  $k_e$ ,  $e_{\text{mean}}$  был выполнен планируемый численный эксперимент с помощью пакета Deform-3D с использованием модели идеального жесткопластического тела. В качестве варьируемых факторов выбраны:  $x_1 = hs/R$ ,  $x_2 = ld/hs$ ,  $x_3 = h/b$ , где  $hs$ ,  $R$ ,  $ld$ ,  $h$ ,  $b$  – параметры очага деформации (рис. 2).

План эксперимента, составленный по методу латинских квадратов [11], и результаты расчета основных деформационных критериев ВЭ приведены в табл. 4.

В результате регрессионного анализа для расчета основных критериев ВЭ получены следующие зависимости:

$$e_{\min} = 3.08 \left( \frac{hs}{R} \right)^{-0.65} \left( \frac{ld}{hs} \right)^{0.87} \left( \frac{h}{b} \right)^{-1.15}, \quad R^2 = 0.97, \quad (3)$$

где  $R^2$  – коэффициент корреляции;

План численного эксперимента и значения основных деформационных критериев ВЭ

№ п/п	$hs/R$	$ld/hs$	$h/b$	$e_{\min}$	$k_e$	$e_{\text{mean}}$
1	3.0	0.10	1.00	0.12	0.67	0.46
2	3.0	0.18	0.75	0.49	0.35	0.88
3	3.0	0.25	0.50	1.01	0.23	1.43
4	7.0	0.10	0.50	0.26	0.41	0.63
5	7.0	0.18	1.00	0.23	0.49	0.64
6	7.0	0.25	0.75	0.38	0.34	0.72
7	11.0	0.10	0.75	0.15	0.41	0.40
8	11.0	0.18	0.50	0.29	0.29	0.49
9	11.0	0.25	1.00	0.20	0.42	0.47

$$k_e = 0.28 \left( \frac{hs}{R} \right)^{-0.06} \left( \frac{ld}{hs} \right)^{-0.39} \left( \frac{h}{b} \right)^{0.76}, \quad R^2 = 0.87; \quad (4)$$

$$e_{\text{mean}} = 3.46 \left( \frac{hs}{R} \right)^{-0.47} \left( \frac{ld}{hs} \right)^{0.55} \left( \frac{h}{b} \right)^{-0.56}, \quad R^2 = 0.93. \quad (5)$$

Давление ВЭ рассчитывается по формуле [1]:

$$p_{\max} = \sigma e_{\text{mean}} + \mu \sigma \frac{2(h+b)l}{hb} + p_{bp}, \quad (6)$$

где  $e_{\text{mean}}$  вычисляется по формуле (4),  $l$  – длина заготовки,  $p_{bp}$  – противодействие.

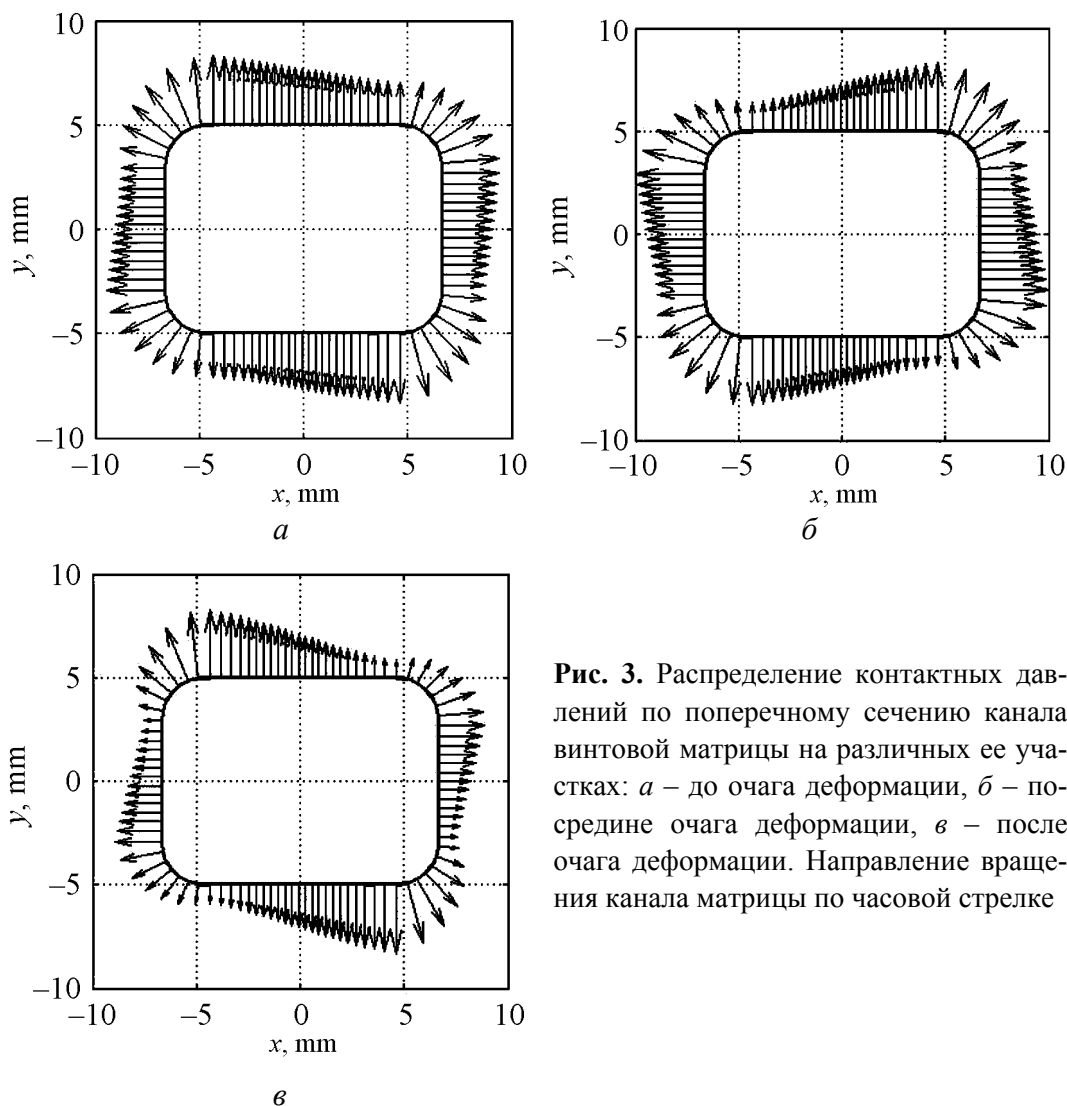
### 5. Распределение контактных давлений

Для расчета инструмента на прочность с учетом силовых моментов, возникающих при деформационной обработке металла ВЭ, разработана программа, позволяющая найти распределение контактных давлений по поверхности винтовой матрицы (рис. 3). Исходными данными для расчета являются параметры очага деформации, полученные при оптимизации, и давление экструзии, рассчитанное по формуле (6).

Из рис. 3 видно, что в очаге деформации силовой момент связан непосредственно с деформацией заготовки, а на участках до и после очага деформации он обусловлен реакцией стенок матрицы.

### Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что модель идеального жесткопластического материала при расчете критериев ВЭ позволяет получить по поперечному сечению заготовки инженерные оценки величин минимальной деформации, неравномерности распределения деформации, а также средней деформации.



**Рис. 3.** Распределение контактных давлений по поперечному сечению канала винтовой матрицы на различных ее участках: *а* – до очага деформации, *б* – по середине очага деформации, *в* – после очага деформации. Направление вращения канала матрицы по часовой стрелке

Предложенный подход позволил разработать совместно с ОАО «Мотор Сич» технологии получения наноструктурного титана для лопаток турбин и гомогенизированной титановой проволоки для ремонта моноколес. Основы разработки технологии ВЭ использовались также в ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины при проектировании опытно-промышленной установки ВЭ, созданной в 2008 г. в рамках инновационного проекта НАН Украины.

1. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, ТЕАН, Донецк (2003).
2. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov, Mater. Sci. Eng. **A503**, 14 (2009).
3. Я.Е. Бейгельзимер, ФТВД **18**, № 4, 77 (2008).
4. Я.Е. Бейгельзимер, ФТВД **20**, № 1, 26 (2010).
5. И.М. Соболев, Р.Б. Статников, Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями, Наука, Москва (1981).
6. Y. Beygelzimer, Mech. Mater. **37**, 753 (2005).

7. *V. Patil Basavaraj, Uday Chakkingal, T.S. Prasanna Kumar*, Materials Processing Technology **209**, 89 (2009).
8. *Г.А. Навроцкий*, Справочник, Т. 3. Холодная объемная штамповка, Машиностроение, Москва (1987).
9. *Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков, А.В. Решетов*, Металл и литье Украины № 11–12, 57 (2005).
10. *О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин*, Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр., Краматорськ (2008), с. 131.
11. *М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер*, Методика рационального планирования экспериментов, Наука, Москва (1970).

*Р.Ю. Кулагин*

### ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ГВИНТОВОЇ ЕКСТРУЗІЇ

Запропоновано новий підхід до розробки технології гвинтовий екструзії (ГЕ), що враховує специфіку процесу. Підхід базується на розрахунку критеріїв – основних характеристик процесу. Показано, що критеріями ГЕ є мінімальна накопичена деформація за один прохід, розподіл накопиченої деформації по поперечному перерізу заготовки і тиск екструзії. Для них у роботі отримано інженерні співвідношення. Ефективність підходу підтверджена стабільною роботою оснащення в дослідно-промислових умовах.

**Ключові слова:** гвинтова екструзія, накопичена деформація, тиск, простий зсув, фрагментація

*Р.Ю. Кулагин*

### SPECIAL FEATURES OF THE TWIST EXTRUSION TECHNOLOGY DESIGNING

A new approach to the development of the twist extrusion (TE) technology is proposed. It takes into account the specifics of the process and is based on calculation of the criteria – the main characteristics of TE. It is shown that the criteria are the minimum accumulated strain after one pass of TE, the distribution of the accumulated strain on the cross-section billets and the extrusion pressure. Engineering relationships have been obtained for them. The effectiveness of the approach is confirmed by a stable work of installations in experimental-industrial conditions.

**Keywords:** twist extrusion, accumulated strain, pressure, simple shear, fragmentation

**Fig. 1.** Distribution of the accumulated strain on the cross-section billet at different values of the strain hardening coefficient  $A$ :  $a - 0$ ,  $b - 1.0$

**Fig. 2.** Schematic showing of the TE deformation zone

**Fig. 3.** Contact pressure distribution over the cross section of the twist channel on its various parts:  $a$  – before the deformation zone,  $b$  – within the deformation zone,  $c$  – after deformation zone. The channel matrix rotates clockwise