

УДК 621.7.01

Кулагин Р. Ю.

УСТАНОВКИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

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]. Изменение структуры и свойств металлов при ВЭ пока изучены слабо, что обуславливает необходимость дополнительных экспериментов при разработке её 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.

Целью работы являлось вскрыть особенности этапа проектирования установок ВЭ и разработать новый подход, повышающий эффективность работы на данном этапе.

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]:

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

где e_{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_{mean} , которую принимали в качестве критерия оптимизации.

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 использовать 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 путём 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 использование 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.

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 σ_0 – предел текучести материала; A – коэффициент деформационного упрочнения, $A = 0$ и $1,0$.

Закон пластического трения был принят в виде $\tau = \mu\sigma$, где μ – коэффициент трения. Согласно работе [9] $\mu = 0,27$. Канал винтовой матрицы имел размеры поперечного сечения 18×28 мм, шаг винтовой линии – 64 мм, длина винтового участка – 16 мм.

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.

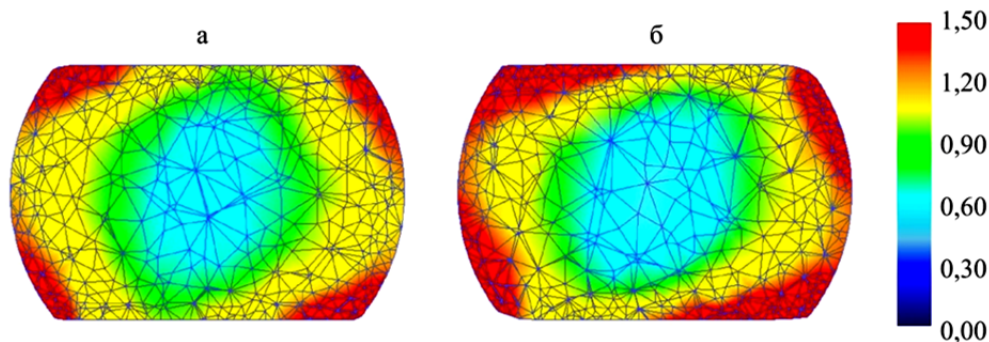


Рис. 1. Распределение накопленных деформаций по поперечному сечению заготовки при разных значениях коэффициента деформационного упрочнения A :
а – 0; б – 1,0

Из рис. 1 следует, что коэффициент деформационного упрочнения достаточно сильно влияет на деформированное состояние заготовки. Материал с упрочнением даёт меньшую 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 %.

Таблица 1

Значения основных деформационных критериев ВЭ (расчет)

Коэффициент A	e_{min}	k_e	e_{mean}
0	0,59	0,26	1,03
1,0	0,5	0,33	1,08

Данные табл. 1 свидетельствуют, что величина 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 получить инженерные оценки по поперечному сечению заготовки 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 BT1-0, медь M1 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 °С, алюминия и меди – 300°С. 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

Фотографии торцов заготовок до и после деформации ВЭ

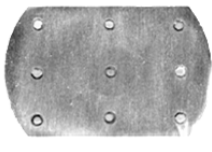
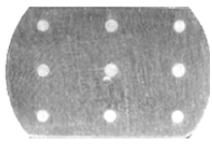
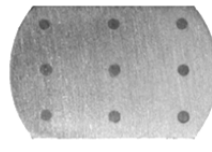
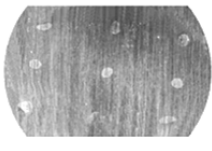
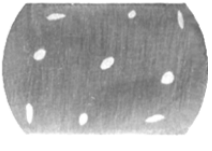
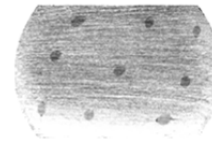
Положение меток	BT1-0	M1	Al-Mg-Sc
До деформации			
После деформации			

Таблица 3

Значения основных деформационных критериев ВЭ (эксперимент)

Материал	e_{min}	k_e	e_{mean}
BT1-0	0,51	0,33	1,12
M1	0,53	0,30	1,04
Al-Mg-Sc	0,57	0,28	1,00

С целью получения соотношений для расчета критериев e_{min} , k_e , e_{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 (см. рис. 2).

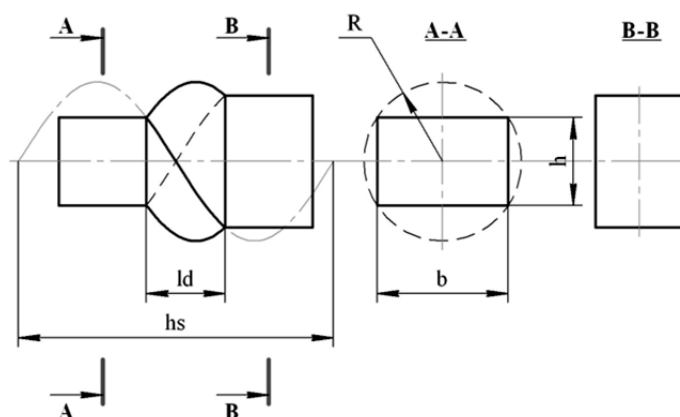


Рис. 2. Схема очага деформации ВЭ:

hs , R , ld , h , b – геометрические параметры матрицы

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

Таблица 4

План численного эксперимента и значения основных деформационных критериев ВЭ

№ п/п	hs/R	ld/hs	h/b	e_{min}	k_e	e_{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

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

$$e_{min} = 3,08 \cdot \left(\frac{hs}{R}\right)^{-0,65} \cdot \left(\frac{ld}{hs}\right)^{0,87} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-1,15}, R^2 = 0,97, \quad (3)$$

где R^2 – коэффициент корреляции;

$$k_e = 0,28 \cdot \left(\frac{hs}{R}\right)^{-0,06} \cdot \left(\frac{ld}{hs}\right)^{-0,39} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0,76}, R^2 = 0,87; \quad (4)$$

$$e_{mean} = 3,46 \cdot \left(\frac{hs}{R}\right)^{-0,47} \cdot \left(\frac{ld}{hs}\right)^{0,55} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-0,56}, R^2 = 0,93. \quad (5)$$

Давление ВЭ рассчитывается по формуле [1]:

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

где e_{mean} – вычисляется по формуле (5);

l – длина заготовки;

p_{br} – противодействие.

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).

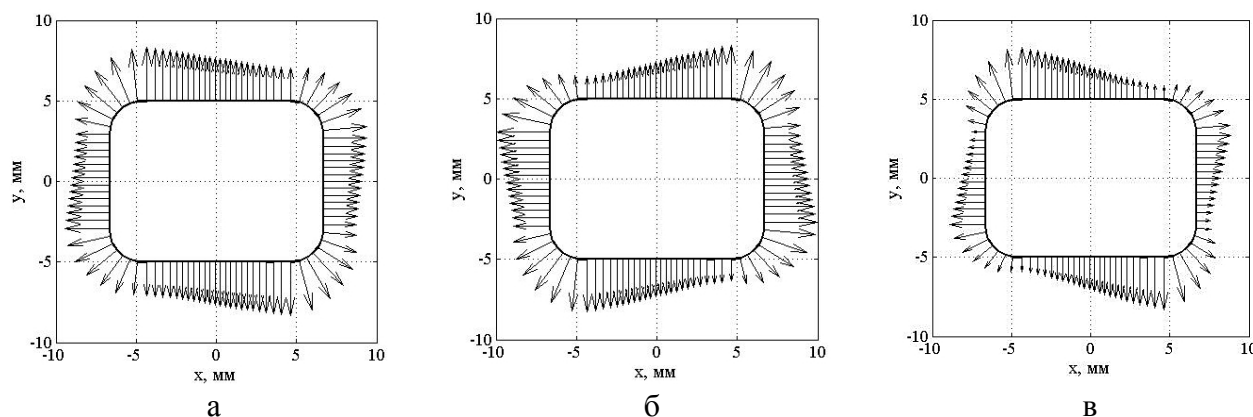


Рис. 3. Распределение контактных давлений по поперечному сечению канала винтовой матрицы на различных её участках (направление вращения канала матрицы по часовой стрелке):

а – до очага деформации; б – посередине очага деформации; в – после очага деформации

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.

Предложенный подход позволил разработать, совместно с ОАО «Мотор Сич», установку ВЭ для 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.

Разработанная методика была также применена при разработке установок ВЭ по заказам международных лабораторий. Так, например, на рис. 4 приведена схема и фотография установки ВЭ для лаборатории Universite Paul Verlaine, Metz, France. Установка смонтирована на базе трехосного гидравлического пресса усилием 0,7 МН и имеет следующие характеристики:

- скорость деформирования до 10 мм/с;
- максимальная сила прессования 350 кН;
- максимальная сила противодействия 100 кН;
- температура нагрева контейнера и матрицы до 350 °С;
- размеры заготовок: сечение 12 × 20 мм, длина до 40 мм.

Основными деталями установки ВЭ (рис.4) являются: 1 – упор, 2 – клин, 3 – полуматрица, 4 – пуансон, 5 – плунжер, 6 – болт М24, 7 – винт, 8 – болт-планка, 9 – штифт, 10 – рамка, 11 – болт М16, 12 – рым-болт М16, 13 – болт М10, 14 – нагреватель, 15 – разъем для подключения питания, 16 – плита пресса.

Особенность установки заключается в возможности реверсивного продавливания заготовки через винтовой канал. В свою очередь это позволяет обеспечить контролируемый режим обработки (обеспечение заданного режима по деформации, температуре, времени), а также возможность реализации больших деформаций ~ 100, что позволяет проводить исследования с варьированием указанных выше параметров в широком диапазоне.

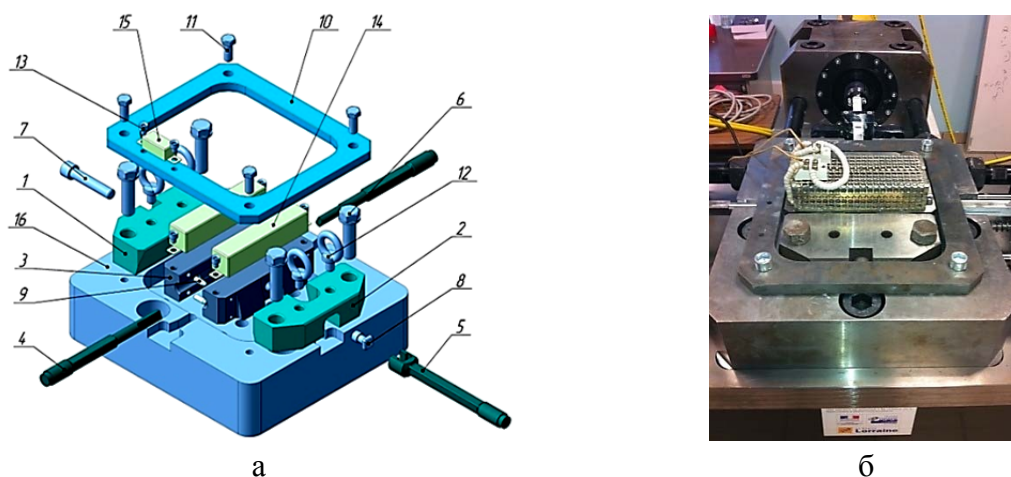


Рис. 4. Установка ВЭ для лаборатории Universite Paul Verlaine:
а – схема; б – фотография в сборе

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили разработать подход к проектированию установок и технологии ВЭ, а также соответствующее программное обеспечение, что существенно повысило эффективность работы технологов и конструкторов на этапах проектирования. Стабильная и надежная работа созданных нами установок ВЭ как для промышленных, так и для лабораторных условий подтверждает эффективность подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
2. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – A 503. – P. 14.
3. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я. Е. Бейгельзимер // *ФТВД*. – 2008. – Том 18, №. 4. – 77–86.
4. Бейгельзимер Я. Е. Простой сдвиг и турбулентность в металлах / Я. Е. Бейгельзимер // *ФТВД*. – 2010. – Том 20, № 1. – С. 26–32.
5. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 111 с.
6. Beygelzimer Y. Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformation of polycrystal : *Mathematical simulation* / Y. Beygelzimer // *Mech. Mater.* – 2005. – V. 37. – P. 753–767.
7. Patil Basavaraj V. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation [Текст] / V. Patil Basavaraj, Uday Chakkingal, T. S. Prasanna Kumar // *J. Mater. Proc. Tech.* – 2009, V. 209. – P. 89–95.
8. Ковка и штамповка : справочник. В 4-х. Т. 3. Холодная объемная штамповка / под ред Г. А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1987. – 384 с., ил.
9. Бейгельзимер Я. Е. Основы технологии получения пластин для травматологии и ортопедии методом винтовой экструзии с последующей прокаткой / Я. Е. Бейгельзимер, С. Г. Сынков, А. В. Решетов // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 11–12. – С. 57–60.
10. Прокофьева О. В. Метод оперативного анализа течения материала при винтовой экструзии / О. В. Прокофьева, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 131–134.
11. Протодьяконов М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер. – М. : Наука, 1970. – 76 с.

Кулагин Р. Ю. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины.

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

E-mail: rkulagin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.02.2012 г.