

УДК 621.7.01

Кулагин Р. Ю.
Бейгельзимер Я. Е.
Латаев А. П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) являются методами обработки металлов давлением с такими характерными особенностями как деформирование до больших степеней деформаций при температуре ниже температуры рекристаллизации, в условиях большого гидростатического давления [1]. Накопление большой логарифмической деформации возможно благодаря периодическому возвращению размеров заготовки к исходным значениям, что в свою очередь позволяет проводить многократную обработку. Одним из основных методов ИПД является винтовая экструзия (ВЭ), имеющая большой потенциал промышленного использования с целью формирования в материале ультрамелкозернистой структуры зеренного типа с большеугловыми границами зерен, а также гомогенизации структурных составляющих и легирующих элементов [2]. В работе [3] деформированное состояние заготовки в процессе ВЭ исследовано экспериментально-расчетным методом.

Целью данной работы является изучение кинематики процесса ВЭ на основе моделирования процесса методом конечных элементов. С использованием пакета Deform-3D выполнен планируемый численный эксперимент и получены регрессионные соотношения для расчета основных характеристик ВЭ.

Суть ВЭ заключается в том, что заготовку призматической формы продавливают через канал штампа имеющий два призматических участка разделенных областью винтовой формы (см. рис. 1).

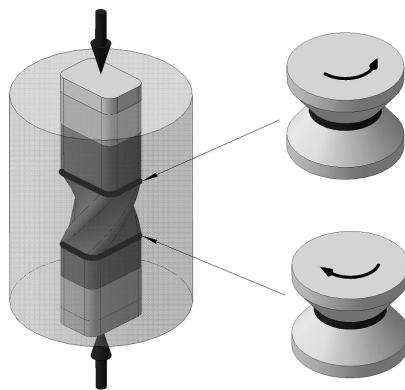


Рис. 1. Схема ВЭ, иллюстрирующая области интенсивного сдвига

Такая геометрия деформирующего канала позволяет реализовать многократную интенсивную пластическую деформацию заготовки при сохранении её первоначальных размеров. Так же винтовой участок канала штампа формирует в очаге деформации мощный вихревой поток, который обеспечивает интенсивное перемешивание деформируемого материала и создает предпосылки для выравнивания концентрации химических элементов. Обработка заготовок методом ВЭ осуществляется под высоким гидростатическим давлением в зоне деформации, которое обеспечивается путем применения противодействия.

В работе [3] экспериментально-расчетным методом показано, что две основные деформационные зоны ВЭ расположены на двух концах винтового участка (см. рис. 1). Напряженно-деформированного состояния (НДС) в этих зонах соответствует схеме простого сдвига в поперечном слое и аналогично НДС, реализуемому при КВД. В плане деформации, в первом приближении, заготовка при ВЭ как бы проходит через две «прозрачных» наковальни Бриджмена (см. вставки на рис. 1). Наличие двух зон интенсивного простого сдвига при ВЭ

подтверждено нами путем расчета этого процесса методом конечного элемента. Кроме того, численные эксперименты, выполненные с помощью этого метода при различных значениях параметров матрицы и деформируемого материала, позволили получить инженерные соотношения для проектирования технологии и оснастки ВЭ.

Для теоретического исследования НДС состояния заготовки при ВЭ использовали систему конечно-элементного моделирования Deform-3D, предназначенную для анализа трехмерного течения металла. Калибровка канала винтовой матрицы представлена на рис. 2.

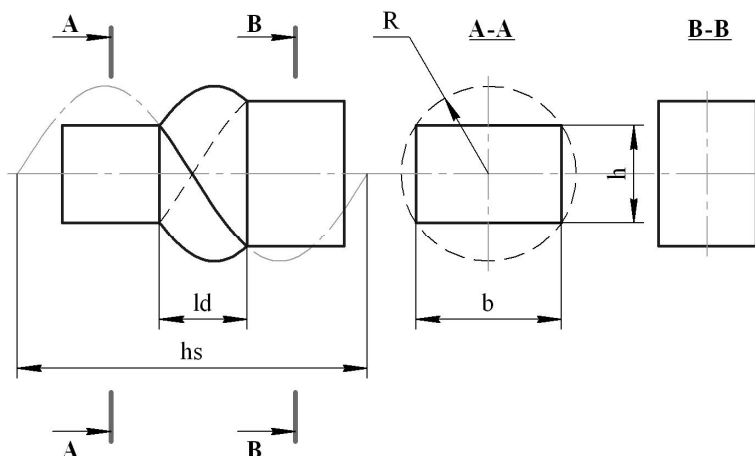


Рис. 2. Калибровка канала винтовой матрицы:
 hs , R , ld , h , b – геометрические параметры матрицы

При моделировании инструмент принимали жестким. Реологию обрабатываемой заготовки принимали как для идеально жесткопластического материала. В расчете использовали условие пластичности Мизеса. Закон пластического трения был принят в виде $t = mS$, где m – коэффициент трения (в расчете $m = 0,25$). Результаты расчета деформированного состояния заготовки при ВЭ показаны на рис. 3. Расчет выполнен для следующих параметров: $hs = 150$ мм, $ld = 25$ мм, $h = 25$ мм, $b = 40$ мм. Ось z направлена вдоль оси экструзии, оси x и y ориентированы, соответственно, по меньшей и большей стороне исходного поперечного сечения канала штампа.

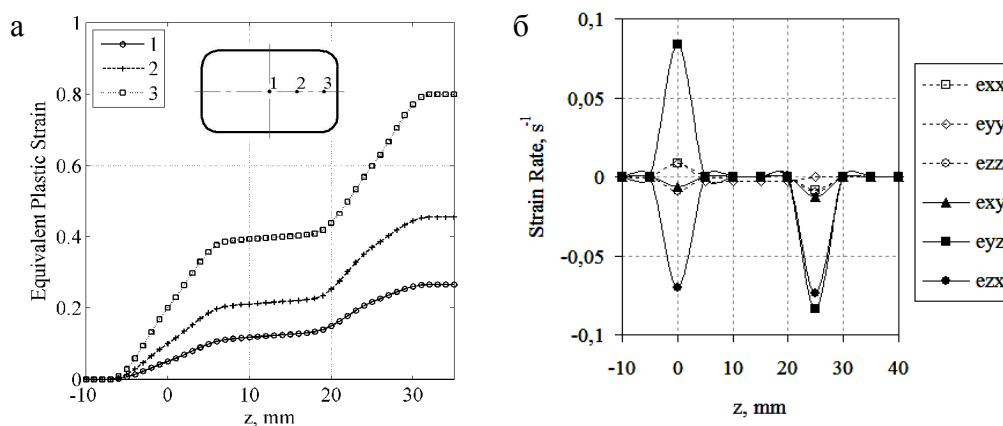


Рис. 3. Характеристики деформированного состояния заготовки при ВЭ

Рис. 3, а показывает наличие двух зон интенсивной деформации на входе и выходе из винтового участка матрицы. Анализ компонент тензора скоростей деформаций (см. рис. 3, б) показывает, что в указанных зонах действительно происходит простой сдвиг в слоях, перпендикулярных оси экструзии. Об этом говорит то, что в указанных зонах модуль компонент e_{zx} , e_{zy} существенно превышает абсолютные значения всех остальных составляющих тензора скоростей деформаций.

Распределение накопленной деформации по поперечному сечению заготовки после одного прохода ВЭ показано на рис. 4. Изолинии уровней образуют замкнутые петли вокруг центра сечения.

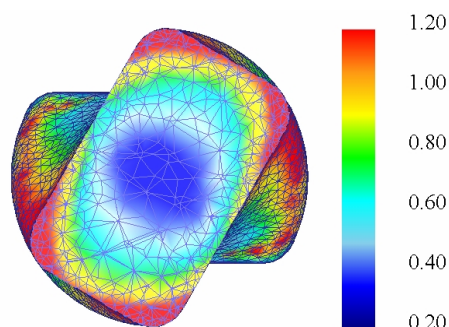


Рис. 4. Распределение накопленной деформации по поперечному сечению заготовки после одного прохода ВЭ

В общем, характер распределения напряжений и накопленных деформаций находится в соответствии с экспериментальными результатами, полученными ранее [3].

При разработке технологии и проектировании оборудования для ВЭ большие значения имеют следующие основные характеристики процесса: давление ВЭ (p), минимальная (e_{min}) и средняя (e_{mean}) деформации, а также равномерность распределения накопленной деформации по сечению заготовки, характеризуемая коэффициентом (k_e) [4]. С целью получения соотношений для расчета указанных характеристик был выполнен планируемый численный эксперимент с помощью Deform-3D. В качестве варьируемых факторов выбраны безразмерные параметры hs/R , ld/hs , h/b , которые изменялись в следующих диапазонах: $hs/R = 3-11$; $ld/hs = 0,1-0,2$; $h/b = 0,5-1$.

В результате регрессионного анализа получены следующие инженерные зависимости для основных характеристик процесса ВЭ:

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

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

$$k_e = 0,28 \cdot \left(\frac{hs}{R}\right)^{-0,06} \cdot \left(\frac{ld}{hs}\right)^{-0,39} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0,76}; \quad (3)$$

$$p = S \cdot \left(e_{mean} + m \frac{2(h+b)l}{hb} \right) + p_{bp}, \quad (4)$$

где l – длина заготовки; p_{bp} – противодействие.

Расчет параметров технологии ВЭ производят на основе удовлетворения основных целей, поставленных перед обработкой: обеспечение 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 для расчета технологии ВЭ предлагается использовать подход многокритериальной оптимизации Соболя-Статникова [5]. Для этого на базе процессора Microsoft Excel с использованием языка Visual Basic for Application разработана компьютерная программа ТЕТ (Twist Extrusion Technology), интерфейс которой показан на рис. 5.

The screenshot shows the TET software interface. On the left is a table of material parameters, and on the right is a schematic diagram of a twist extrusion matrix and an optimization table.

Технология ВЭ			
Дата:	12.10.2009		
Название:	Прикладные нанотехнологии для передовых		
Материал:	Титан BT1-0		
Объем материала	V	150,0	см ³
Длина заготовки	l	100,0	мм
Температура деформации	T	350	о
Сопротивление деформации	σ _{0,2}	250	МПа
Противодавление	p _{0,2}	100	МПа
Коэффициент трения	f _{тр}	0,27	-
Необходимая степень деформации	e	1,5	-
Радиус описанной окружности	R	25,0	мм
Шаг заготовки	h	29,2	мм
Ширина заготовки	b	41,5	мм
Длина винтового участка	l _д	23,1	мм
Шаг винтовой линии	h _с	87,3	мм
Длина фальш-заготовки	l _ф	25,0	мм
Угол поворота поперечного сечения	φ	95,4	о
Угол скоса винтовой линии	β	60,0	о
Минимальная деформация за проход	e _{min}	0,64	-
Предельная деформация за один проход	e _{max}	1,17	-
Коэфф. однородности деформации	ke	0,76	-
Кол-во проходов	n	2	-
Давление экструзии	p	1165	МПа
Сила экструзии	F	166	т

Схема калибровки винтовой матрицы

Оптимизация калибровки

Факторы		min	max
<input checked="" type="checkbox"/> φ	x1	11,0	11,0
<input type="checkbox"/> h _с	x2	0,10	0,25
<input checked="" type="checkbox"/> R	x3	1,00	1,00

Целевые значения	мин. деформация	e _{min}	0,2	-
макс. давление	p/σ _{0,2}	1	-	-

Критерии	k		Γ	
	e _{min}	ke	1,00	0,09
	0,00	0,25	0,00	0,00
	1,00	0,72	0,72	0,72

Выполнить оптимизацию Сгенерировать результаты

Рис. 5. Интерфейс программы TET

Использование TET позволяет технологу решать задачу разработки наиболее оптимальной технологии ВЭ не варьированием всего множества конструктивных параметров калибровки, а сочетанием основных технологических критериев процесса.

ВЫВОДЫ

Расчет в пакете Deform-3D подтвердил наличие двух зон интенсивного сдвига на концах винтового участка матрицы.

Спланированный компьютерный эксперимент и его последующая обработка позволили получить простые инженерные соотношения для расчета основных характеристик процесса ВЭ. Разработана программа TET для многокритериальной оптимизации технологии ВЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valiev R. Z. *Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation* / Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, Y. T. Zhu // *JOM*. – 2006. – Vol. 58(4). – P. 33–39.
2. Beygelzimer Y. *Useful properties of twist extrusion* / V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Mat. Sci. Eng. A*. – 2009. – Vol. 503. – P. 14–17.
3. *Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method* / A. Reshetov, Y. Beygelzimer, R. Kulagin, S. Synkov, O. Prokof'eva // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – P. 35–42.
4. Кулагин Р. Ю. *Особенности разработки технологии винтовой экструзии* / Р. Ю. Кулагин // *ФТВД*. – 2010. – № 3. – С. 93–100.
5. Соболев И. М. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями* / Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.

Кулагин Р. Ю. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;

Латаев А. П. – ведущий инженер ООО «АРТЕХ».

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

ООО «АРТЕХ» – ООО «Инжиниринговая компания Артех», г. Орел, Россия.

E-mail: rkulagin@gmail.com