

УДК 621.7

Бейгельзимер Я. Е.
Варюхин В. Н.**ВИНТОВАЯ ЭКСТРУЗИЯ В ДОНЕЦКОМ ФИЗТЕХЕ**

Юбилеи дают повод взглянуть на текущую работу в целом и задуматься над ее местом в общей картине происходящего. В этой статье, посвященной 50-летию ДонФТИ НАН Украины и 100-летию его первого директора, академика Галкина, мы хотели бы в таком ракурсе посмотреть на винтовую экструзию (ВЭ), которую предложили в 1999 году и развиваем в институте уже более 15 лет.

На сегодняшний день опубликованы многие десятки статей, в которых изложены результаты исследований разных лабораторий мира по механике винтовой экструзии и воздействию ее на структуру и свойства материалов. Есть обзорные работы, которые либо специально посвящены ВЭ (см., напр., [1–3]), либо содержат сведения о ней (см., напр., [4–5]). Все это освобождает нас от необходимости приводить здесь какие-либо конкретные результаты по ВЭ.

В данной статье мы попытаемся ответить на следующие вопросы. Как ВЭ связана с предыдущей деятельностью Донецкого Физтеха по высоким давлениям? Что нового она дала для науки и практики? Какие открывает перспективы?

Но вначале приведем краткие сведения о винтовой экструзии.

Общие сведения о винтовой экструзии

При ВЭ образец продавливают через матрицу с каналом постоянного поперечного сечения, который состоит из двух участков с цилиндрической поверхностью, разделенных участком винтовой формы (рис. 1).

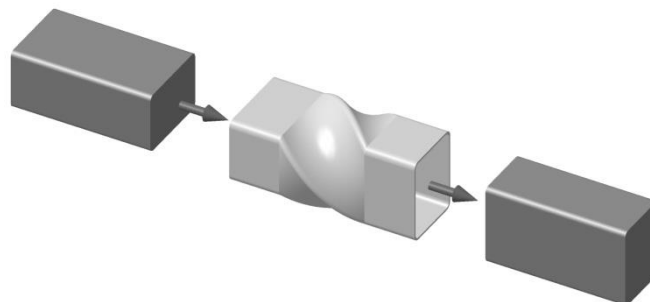


Рис. 1. Схема винтовой экструзии

Форма направляющей цилиндрической поверхности определяет поперечное сечение канала и может быть достаточно произвольной (см., напр., рис. 2).

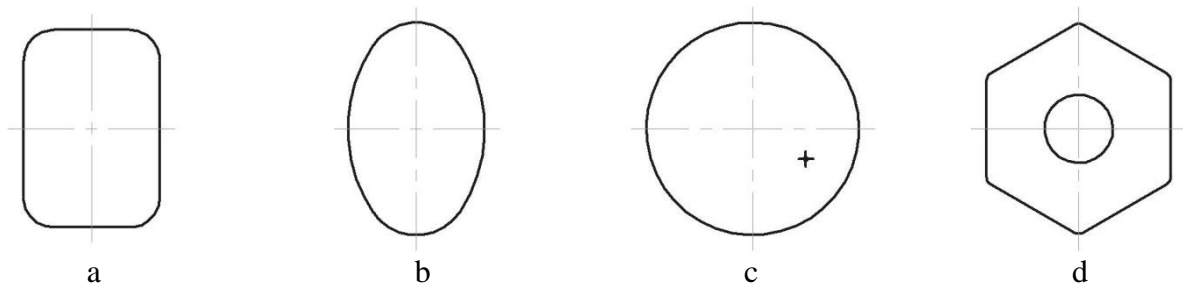


Рис. 2. Примеры сечения каналов матриц для винтовой экструзии:

a – прямоугольный; b – овальный; c – круглый, крестиком показано положение оси экструзии; d – шестиугольный с отверстием

Имеется возможность обработки заготовок круглого сечения при смещении центра круга относительно оси экструзии (рис. 2, c), а также заготовок с внутренним каналом, для чего необходима оправка (рис. 2, d).

В ходе обработки материал испытывает интенсивный сдвиг, при сохранении идентичности начального и конечного сечений образца. Последнее обстоятельство позволяет осуществлять его многократную экструзию с целью накопления большой деформации, приводящей к изменению структуры и свойств материала.

ВЭ относится к так называемым методам интенсивной пластической деформации (ИПД) [4, 5]. В отличие от традиционной обработки давлением, при которой изменяется форма обрабатываемых заготовок, при ИПД размеры образцов до и после выдавливания одинаковы. Эти методы применяют, в основном, для того, чтобы создавать в материалах субмикроструктурные структуры (СМК) [4, 5].

В 1999 году, когда была предложена ВЭ [6], методов ИПД было немного: кручение под высоким давлением (КВД), равноканальное угловое прессование (РКУП), всесторонняя ковка и накапливаемое соединение прокаткой (НСП) [5]. Бурное развитие ИПД в последние 10 лет привело к созданию большого числа новых методов, которых сейчас насчитывается около 30 [4]. Однако базовыми называют всего 5 из них: к указанным выше четырем добавилась ВЭ. Эксперты считают, что именно эти методы ИПД имеют наибольший научный и (или) практический потенциал [4].

Сейчас уже эффективность обработки методом ВЭ показана на сплавах алюминия, меди, титана, никеля, железа, а также при обработке вторичного сырья. Материалы, полученные ВЭ, исследуют в лабораториях Франции, Ирана, Китая, Индии, Германии, Австралии, России, США, Южной Кореи. Во многих лабораториях есть свои установки винтовой экструзии, некоторые из которых, например, в Labex DAMAS (Metz, France), изготовлены в ДонФТИ.

Как винтовая экструзия связана с гидроэкструзией?

В Донецком Физтехе занимались большими деформациями под давлением со дня его основания. Эти работы объединялись под флагом «гидроэкструзия» – выдавливание металлов жидкостью высокого давления. В связи с ними, прежде всего, нужно упомянуть имя Александра Александровича Галкина, академика АН УССР, первого директора Физтеха, который инициировал исследования и разработки по гидроэкструзии в институте и активно сам в них участвовал.

Работы выполнялись широким фронтом, от изучения механизмов больших пластических деформаций и разрушения под высоким давлением (В. И. Зайцев, Т. Е. Константинова, В. В. Токий и др.), до анализа материаловедческих и технологических аспектов гидроэкструзии (Б. И. Береснев, В. З. Спусканюк, Б. М. Эфрос, В. С. Ковико, А. П. Гетманский, В. П. Буряк, Н. И. Матросов, В. А. Богданов, В. П. Алексеев, Е. Н. Высоцкий, В. И. Косяк и др.).

Широкий охват проблемы, выполнение в одном институте исследований по физике, механике, материаловедению и технологии обработки материалов давлением, позволили реализовать в Донецком Физтехе мультимасштабный подход к большой пластической деформации. Определенный итог этого направления был подведен в монографии [9], где была обоснована следующая гипотеза: все возможные пути (истории) деформирования металлов можно разделить на несколько групп, каждой из которых соответствует свой сценарий эволюции микроструктуры и свойств; «тумблерами», переключающими сценарии, являются схема деформации, температура и гидростатическое давление, достаточно большой величины.

Это утверждение было не тривиальным. Устоявшимися являлись представления о так называемой «единой кривой упрочнения» и единых, не зависящих от схемы нагружения, механизмах большой пластической деформации металлов. Особенности разных видов деформирования допускались, но они ограничивались, в основном, текстурами. Согласно такой концепции, ничего «революционно нового» от деформационной обработки ожидать не приходилось: как ни деформируй металл при низких гомологических температурах, его прочность будет расти, а пластичность падать. Гипотеза о том, что это может быть не так, давала надежду, но требовала доказательств.

В период окончания работы над монографией [9] авторы начали работы по винтовой экструзии. При ВЭ материал деформируется по схеме простого сдвига, в тонких слоях, разделяющих винтовую и цилиндрические части матрицы. Из-за того, что ее канал имеет

постоянное поперечное сечение, удлинения при ВЭ нет. При прокатке полосы и традиционной гидроэкструзии оно есть, это другие схемы деформации. Согласно упомянутой выше гипотезе можно было ожидать, что ВЭ реализует сценарии эволюции структуры и свойств, отличные от тех, что дает гидроэкструзия и прокатка. Последующие эксперименты действительно показали, что при ВЭ есть целый ряд особенностей по сравнению с прямой экструзией или прокаткой: образуется большая доля высокоугловых границ; средний размер зерен и напряжение течения выходят на насыщение; при деформации происходит интенсивный массоперенос; в результате обработки материалы повышают свою пластичность и т. д.

Чем винтовая экструзия отличается от гидроэкструзии?

В предыдущем разделе показано, что исследования по винтовой экструзии стали естественным продолжением работ по большим пластическим деформациям в Донецком Физтехе, которые объединялись под флагом «гидроэкструзия». Если считать «гидроэкструзию» флагом, а не процессом пластической деформации, то винтовая экструзия тоже идет под ним. Но считать так неправильно. Это как если бы называть работы по электромагнетизму одним словом – электродвигатель, или работы по фазовым превращениям – кипением. Имя какого-либо устройства или процесса не может подменять название целой области исследований.

Слово «гидроэкструзия» означает выдавливание образца из замкнутого объема под действием сжатой жидкости. При этом образец приобретает заданное сечение, а длина его увеличивается. Конечно, при гидроэкструзии изменяются структура и свойства материалов. Но это следствие пластической деформации, процесса гораздо более широкого и глубокого, чем выдавливание.

ВЭ действительно относится к классу процессов выдавливания, т.к. в этом процессе материал истекает из замкнутого объема под действием сил, приложенных к заготовке. Но этим признаком и ограничивается родство ВЭ с традиционными представителями указанного класса, в том числе и с традиционной гидроэкструзией. Ни длина, ни поперечное сечение заготовки при ВЭ не изменяются. Пластическая деформация материалов в процессе ВЭ происходит по схеме простого сдвига в узких зонах на входе и выходе из винтового участка матрицы. Это, по сути, роднит ВЭ с кручением дисков под давлением.

Образно, ВЭ можно рассматривать как экструзию заготовки через две «прозрачные» наковальни Бриджмена (см. рис. 3). При этом узкие зоны простого сдвига как бы сканируют заготовку по длине, преобразуя структуру и свойства экструдированных материалов.

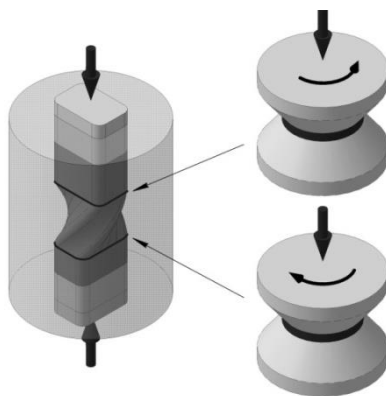


Рис. 3. Аналогия винтовой экструзии с КВД: в начале винтового участка матрицы, в поперечном сечении заготовки происходит простой сдвиг, подобный тому, что при кручении дисков под высоким давлением

Гипотеза о причине особых свойств простого сдвига

Выше мы уже не раз отмечали, что при ВЭ материалы деформируются по схеме простого сдвига, т.е. по-другому, чем в традиционных процессах обработки давлением, и это каким-то особым образом сказывается на их структуре и свойствах. Аналогичными признаками характеризуются и другие процессы ИПД, основанные на простом сдвиге (КВД, РКУП и др.) [4, 5]. Что же является причиной необычного поведения материалов при такой деформации?

В работах [10, 11] высказана гипотеза о том, что причиной различий в физике процессов деформации является их разная геометрия. Ниже приведены некоторые основания для такого заключения.

Рассмотрим простой сдвиг как геометрическое преобразование, задаваемое соотношением:

$$\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{X}, \quad (1)$$

где \mathbf{X} и \mathbf{x} – соответственно, начальные и конечные координаты точки;

$$\mathbf{S}(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

где $\mathbf{S}(\gamma)$ – оператор преобразования простого сдвига, γ – деформация сдвига.

Непосредственными вычислениями легко показать, что преобразования простого сдвига с $\gamma \in (-\infty, \infty)$ удовлетворяют основным четырем аксиомам теории групп [12]. Действительно, рассмотрим два последовательных преобразования (2) с деформациями сдвига γ_1 и γ_2 соответственно:

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}(\gamma_1) \text{ и } \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}(\gamma_2) \quad (3)$$

Очевидно

$$\mathbf{S}_2\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 + \gamma_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}(\gamma_1 + \gamma_2) \quad (4)$$

Следовательно, суперпозиция двух простых сдвигов вдоль одного и того же направления дает в результате простой сдвиг вдоль того же направления. Это означает, что преобразования (2) удовлетворяют аксиоме замкнутости. Таким же образом легко показать, что множество (2) удовлетворяет аксиоме ассоциативности, т. е., $\mathbf{S}_3(\mathbf{S}_2\mathbf{S}_1) = (\mathbf{S}_3\mathbf{S}_2)\mathbf{S}_1$. Кроме того, очевидно, что во множестве $\mathbf{S}(\gamma)$ есть единичный элемент $\mathbf{I} = \mathbf{S}(0)$, и для каждого преобразования $\mathbf{S}(\gamma)$ имеется обратный элемент $\mathbf{S}^{-1}(\gamma)$ такой, что $\mathbf{S}^{-1}(\gamma)\mathbf{S}(\gamma) = \mathbf{I}$ ($\mathbf{S}^{-1}(\gamma) = \mathbf{S}(-\gamma)$).

Таким образом, согласно определению группы [12], множество простых сдвигов вдоль одного направления образуют группу преобразований. Из соотношения (4) следует групповое свойство простого сдвига:

$$\mathbf{S}(\gamma_2)\mathbf{S}(\gamma_1) = \mathbf{S}(\gamma_1 + \gamma_2) \quad (5)$$

Теперь рассмотрим геометрические преобразования $\mathbf{P}(\lambda)$ – чистого сдвига без изменения объема, и $\mathbf{E}(\lambda)$ – одноосного удлинения без изменения объема. Здесь

$$\mathbf{P}(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{E}(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-1/2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-1/2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент удлинения.

Первое из этих преобразований реализуется при плоской прокатке, второе – при прямой экструзии (в том числе и традиционной гидроэкструзии).

Аналогично предыдущему, легко показать, что $\mathbf{P}(\lambda)$ и $\mathbf{E}(\lambda)$ образуют две разные группы преобразований, но с одним и тем же групповым свойством:

$$\mathbf{P}(\lambda_2)\mathbf{P}(\lambda_1) = \mathbf{P}(\lambda_2\lambda_1) \text{ и } \mathbf{E}(\lambda_2)\mathbf{E}(\lambda_1) = \mathbf{E}(\lambda_2\lambda_1) \quad (7)$$

В отличие от (5), последние соотношения нелинейны: аргумент суммарного преобразования равен произведению аргументов составляющих, а не сумме, как в (5).

Покажем, каким образом различие в групповых свойствах геометрических преобразований может сказаться на структуре материалов, подвергнутых соответствующим видам деформации.

Пусть малый объем материала подвергается деформации, которой соответствует геометрическое преобразование $\mathbf{G}(\xi)$, где ξ – параметр преобразования. Естественно предположить, что средний размер D зерна этого объема является функцией ξ и определяется по формуле:

$$D = f(\xi)D_0 \quad (8)$$

где D_0 – средний размер зерна до деформации; $f(\xi)$ – безразмерная функция ξ .

Поддействуем на этот объем двумя последовательными преобразованиями $\mathbf{G}(\xi_1)$ и $\mathbf{G}(\xi_2)$. Тогда получим:

$$D = f(\xi_2)f(\xi_1)D_0 \quad (9)$$

С другой стороны:

$$D = f(\xi_\Sigma)D_0, \quad (10)$$

где ξ_Σ соответствует параметру суммарного преобразования.

Применяя эти рассуждения к рассмотренным выше преобразованиям, получаем:

$$f(\xi_1 + \xi_2) = f(\xi_2)f(\xi_1) \quad (11)$$

для преобразования (2) и

$$f(\xi_1 \cdot \xi_2) = f(\xi_2)f(\xi_1) \quad (12)$$

для преобразований (6).

Решением функционального уравнения (11) является

$$f(\xi) = a^{k\xi}, \quad (13)$$

а решением (12) –

$$f(\xi) = \xi^n, \quad (14)$$

где a , k и n – параметры (см., напр., [13]).

Таким образом, зависимость среднего размера зерна для простого сдвига определяется формулой

$$D(\gamma) = a^{k\gamma} D_0, \quad (15)$$

а для чистого сдвига и одноосного удлинения

$$D(\lambda) = \lambda^n D_0. \quad (16)$$

Для определения параметра n предположим, что каждый малый объем материала деформируется подобно образцу в целом. Это допущение хорошо известно в литературе как принцип Тейлора, который первым применил его при расчете текстур. Эксперимент показывает, что при однородной деформации чистого сдвига и одноосного удлинения оно хорошо соответствует действительности. Применив соотношение (16) к поперечному размеру образца, получаем, что в случае чистого сдвига $n = -1$, а при одноосном удлинении $n = -0.5$. Иными словами, при плоской прокатке и прямой экструзии средний поперечный размер зерен определяется, соответственно, по формулам:

$$D(\lambda) = \lambda^{-1} D_0, \quad (17)$$

$$D(\lambda) = \lambda^{-1/2} D_0, \quad (18)$$

Для того чтобы определить параметры a , k учтем, что, согласно [14], простой сдвиг имеет две стадии, а принцип Тейлора применим лишь ко второй, которая начинается при некотором критическом значении γ_c деформации сдвига. Согласно [10], при $\gamma = \gamma_c$ доля высокоугловых границ деформационного происхождения, с возможностью проскальзывания зерен вдоль границы, достигает перколяционного предела.

Применяя, при $\gamma > \gamma_c$, соотношение (15) к поперечному размеру слоя сдвига и учитывая, что он остается при деформации неизменным (симметрия простого сдвига), получаем, $a = 1$. Иными словами, на второй стадии простого сдвига:

$$D(\gamma) = D_0 = const, \quad (19)$$

Таким образом, оказывается, что стационарная микроструктура и связанная с ней идеальная пластичность материалов при больших деформациях простого сдвига, которые обнаружены экспериментально (см., напр., [15]), могут быть обусловлены групповым свойством и симметрией преобразования простого сдвига.

Учитывая, что на первой стадии простого сдвига средний размер зерна убывает с ростом деформации, получаем из (15):

$$D(\gamma) = a^{-k'\gamma} D_0, \quad (20)$$

где $a > 1, k' > 0$. Определить численные значения параметров a и k' можно лишь на основе эксперимента, но соотношение (20) приводит к интересному выводу качественного характера: на первой стадии простого сдвига размер зерен должен убывать быстрее (показательный закон), чем при чистом сдвиге или одноосном удлинении (степенной закон (17) и (18)). Это явление также отмечается в эксперименте (см., напр., [5]).

В работах [10, 11] показано, что и другие эффекты простого сдвига могут быть объяснены групповыми свойствами и симметрией связанного с ним геометрического преобразования. Таким образом, особенности ВЭ, КВД и РКУП, возможно, имеют глубокие корни.

Возможности практического применения ВЭ

Сейчас можно выделить три основных направления прикладных работ по ВЭ:

- создание субмикроструктурных структур в объемных образцах (см., напр., [1–5]);
- повышение пластичности вторичных цветных металлов и сплавов, что позволяет значительно расширить ассортимент продукции, которая может быть из них изготовлена (см., напр., [7]);
- создание объемных образцов путем консолидации порошковых материалов, что позволяет формировать совершенно новые композиции с уникальными характеристиками (см., напр., [8]).

По каждому из этих направлений ДонФТИ имеет опыт работы с промышленными фирмами и предприятиями. Совместно с ОАО «Мотор Сич» разрабатывается технология получения наноструктурного титана для лопаток турбин и гомогенизированной титановой проволоки для ремонта моноколес. По заказу Запорожского титаномагниевого комбината разработана технология получения электродов из титановой губки для электрошлакового переплава. Совместно с ООО «Донсплав» разработана технология деформационной гомогенизации вторичных цветных сплавов. По заказам американской машиностроительной корпорации Дженерал Электрик обработаны титановые и железоникелевые сплавы, а по заказу компании Боинг – авиационные алюминиевые сплавы.

В рамках инновационного проекта НАН Украины, в ДонФТИ создана полупромышленная установка ВЭ, позволяющая обрабатывать заготовки, размером 30мм x 40мм x 140мм. На базе этой установки, с целью проведения маркетинговых исследований и работы с инвесторами, создан участок по получению наноструктурного титана медицинского назначения.

Несколько слов о задачах, связанных с промышленным освоением ВЭ. Нужны опытно-промышленные установки, надежные и удобные в работе, позволяющие деформировать различные сплавы в контролируемых условиях, при заданной температуре и продолжительности цикла обработки, при фиксированном противодавлении. Для этого необходимы хорошо продуманные конструкции, и, что еще важнее, четкая организация и жесткая дисциплина труда при изготовлении установок и работе на них. Это возможно лишь при наличии инженеров и рабочих высокой квалификации, а также современного станочного и прессового оборудования. В наших условиях такие требования часто оказываются невыполнимыми. Таким образом, передача в производство технологии винтовой экструзии требует изменения существующих условий.

Какие перспективы открывает ВЭ в науке?

Выше мы уже отмечали, что особенности ВЭ могут иметь глубокие корни в геометрии и физике пластической деформации. Это открывает широкие перспективы исследований. Приведем в связи с этим три наиболее важные фундаментальные проблемы.

Первая имеет более, чем 150-летнюю историю и уходит корнями в классические эксперименты по пластичности, выполненные А. Треска. В наибольшей степени его тогда поразила так называемая идеальная пластичность – возможность течения твердых тел при комнатной температуре подобно жидкости, без упрочнения. История сложилась так, что исследования в то время сосредоточились на упруго-пластическом переходе и эффекте упрочнения, а идеальная пластичность долгое время оставалась в науке лишь в качестве математической модели. В настоящее время это явление надежно наблюдают в процессах деформации, реализующих простой сдвиг достаточно большой величины [15]. Идеальная пластичность металлов при больших деформациях свидетельствует о качественно новом их состоянии, поэтому, подобно сверхтекучести и сверхпроводимости это явление представляет фундаментальный интерес.

Вторая проблема связана с механикой простого сдвига. Дело в том, что от чистого сдвига он отличается лишь тензором поворота, который, согласно фундаментальным принципам механики [16] не должен влиять на свойства материалов. Особенности же простого сдвига указывают на обратное. Это требует пересмотра основ механики пластичности и корректировки моделей материалов (см., напр., [17]).

Третья фундаментальная проблема связана с массопереносом при простом сдвиге. Есть основания полагать, что движение металлических материалов на микроуровне, при больших деформациях простого сдвига, имеет турбулентный характер [18]. Физика явления при этом, конечно, другая, чем та, что определяет турбулентность газов и жидкостей, но кинематика сходна – случайные вихри разных размеров. По всей видимости, именно они осуществляют аномально быстрый (скорость на много порядков превышает ту, что дает диффузия) массоперенос при большой пластической деформации простого сдвига. Пока это лишь гипотеза, но очень вдохновляющая.

Исследования по винтовой экструзии позволили увидеть в деформируемом твердом теле эффективный инструмент для формирования мультимасштабных структур, придающих ему новые свойства. Такие структуры можно создавать как из собственно материала тела, так и из различных элементов, заложенных в образец предварительно или подводимых к его поверхности во время деформации. Доставка, подгонка друг к другу и сборка элементов в единую конструкцию, внутри тела образца, осуществляется благодаря эффектам пластической деформации: изменению размеров и формы элементов, аномально быстрому массопереносу, делению кристаллов на фрагменты, поворотам кристаллов, образованию новых кристаллов, образованию и залечиванию несплошностей, фазовым превращениям и т.д.

ВЫВОДЫ

В настоящее время винтовая экструзия прочно заняла свое место в лабораторных исследованиях по интенсивной пластической деформации и, по мнению международных экспертов, входит в пятерку процессов ИПД с наибольшими перспективами промышленного применения. Особенности ВЭ по формированию структуры и свойств материалов могут иметь глубокие корни в геометрии и физике пластической деформации. Это открывает широкие перспективы для дальнейших работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Materials Science and Engineering A* / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov – 503, 14 (2009).
2. *Винтовая экструзия – процесс накопления деформации* / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сырко. – Донецк: ТЕАН, 2003. – 87 с.
3. *Materials Science Forum* / V. Varyukhin, Y. Beygelzimer, R. Kulagin, O. Prokof'eva, A. Reshetov. – Vols. 667-669, 31 (2011).
4. *Acta Materialia* / Y. Estrin, A. Vinogradov. – 61, 782 (2013).
5. Валиев Р. З. *Объемные наноструктурные металлические материалы* / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
6. *ФТВД* / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, С.Г. Сынков, А.Н. Сапронов В.Г. Сынков. – 9, 3, 109 (1999).

7. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминийсодержащих отходов / А.И. Шевелев, Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин [и др.]. – Донецк: «Ноулидж», 2010. – 270 с.
8. *Materials Science and Engineering A* / A.Shpak, V. Varyukhin, V. Tkatch, V. Maslov, Y. Beygelzimer, S. Synkov, V. Nosenko, S. Rassolov. – 425, 172 (2006).
9. Бейгельзимер Я. Е. Физическая механика гидростатической обработки материалов / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н.Варюхин, Б.М.Эфрос. – Донецк: ДонФТИ НАНУ.– 2000.– 196 с.
10. Beygelzimer Y., Lavrinenko N. arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci] (2012).
11. Beygelzimer Y. arXiv:1301.1281[cond-mat.mtrl-sci] (2013).
12. Курош А.Г. Теория групп.-М.: Наука, 1967.- 648 с.
13. Small C. G. *Functional Equations and How to Solve Them (Problem Books in Mathematics)*, Springer, New York, 2006.
14. Beygelzimer Y., Valiev R., Varyukhin V., *Materials Science Forum* – Vols. 667–669, 97 (2011).
15. Pippan R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A. and Bachmaier A. *Annual Review of Materials Research*, 40, 319 (2010).
16. Трудзелл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / К. Трудзелл. – М. : Наука, 1975. –592 с.
17. Kulagin R., Latypov M., Kim H.S., Varyukhin V. and Beygelzimer Y. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44a, 3211 (2013).
18. Beygelzimer Y. *Materials Science Forum*, 683, 213 (2011).

REFERENCES

1. *Materials Science and Engineering A* / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov – 503, 14 (2009).
2. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii / Ja.E. Bejgel'zimer, V.N. Varjuhin, D.V. Orlov, S.G. Synko. – Doneck: TEAN, 2003.– 87 s.
3. *Materials Science Forum* / V. Varyukhin, Y. Beygelzimer, R. Kulagin, O. Prokof'eva, A. Reshetov. – Vols. 667-669, 31 (2011).
4. *Acta Materialia* / Y. Estrin, A. Vinogradov. – 61, 782 (2013).
5. Valiev R. Z. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy* / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. – М.: Akademkniga, 2007. – 398 s.
6. FTVD / Ja.E.Bejgel'zimer, V.N.Varjuhin, S.G.Synkov, A.N.Sapronov V.G.Synkov. – 9, 3, 109 (1999).
7. *Deformacionnaja obrabotka vtorichnogo aljuminija i aljuminijisoderzhashhih othodov* / A.I. Shevelev, Ja.E. Bejgel'zimer, V.N. Varjuhin [i dr.]. – Doneck: «Noulidzh», 2010. – 270 s.
8. *Materials Science and Engineering A* / A.Shpak, V. Varyukhin, V. Tkatch, V. Maslov, Y. Beygelzimer, S. Synkov, V. Nosenko, S. Rassolov. – 425, 172 (2006).
9. Bejgel'zimer Ja. E. *Fizicheskaja mehanika gidrostatischej obrabotki materialov* / Ja.E. Bejgel'zimer, V.N.Varjuhin, B.M.Jefros. – Doneck: DonFTI NANU.– 2000.– 196 s.
10. Beygelzimer Y., Lavrinenko N. arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci] (2012).
11. Beygelzimer Y. arXiv:1301.1281[cond-mat.mtrl-sci] (2013).
12. Kurosh A.G. *Teorija grupp*.-М.: Nauka, 1967.- 648 s.
13. Small C. G. *Functional Equations and How to Solve Them (Problem Books in Mathematics)*, Springer, New York, 2006.
14. Beygelzimer Y., Valiev R., Varyukhin V., *Materials Science Forum* – Vols. 667–669, 97 (2011).
15. Pippan R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A. and Bachmaier A. *Annual Review of Materials Research*, 40, 319 (2010).
16. Trusdell K. *Pervonachal'nyj kurs racional'noj mehaniki sploshnyh sred* / K. Trusdell. – М. : Nauka, 1975. – 592 s.
17. Kulagin R., Latypov M., Kim H.S., Varyukhin V. and Beygelzimer Y. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44a, 3211 (2013).
18. Beygelzimer Y. *Materials Science Forum*, 683, 213 (2011).

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр. ДонФТИ

Варюхин В. Н. – чл.-корр. НАН Украины, директор ДонФТИ

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

НАН Украины – Национальная академия наук Украины.

E-mail: yanbeygel@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г.