



## Методика оптимизации канала матриц для винтовой экструзии

Д.В. Павленко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

### Article info:

Paper received:

02 February 2015

The final version of the paper received:

16 September 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru)

Рассмотрена методика определения напряженно-деформированного состояния образца, подвергнутого интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии. Показана возможность использования метода конечных элементов для оптимизации технологической оснастки при реализации процесса винтовой экструзии. Результаты моделирования показали, что разработанная методика является эффективной для оптимизации параметров винтового канала при проектировании матриц для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии. В результате ее применения возможно выполнение оптимизации профиля винтового канала, установление закономерностей изменения угла закрутки, а также интенсивности и абсолютной величины касательных напряжений и деформаций.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, метод конечных элементов, субмикроструктурная структура.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) в последнее время находят самое широкое применение для формирования в объемных заготовках изделий машиностроения субмикроструктурной структуры. Особенности структуры и свойств металлов, подвергнутых интенсивным пластическим деформациям, достаточно хорошо изучены в работах отечественных и зарубежных исследователей и являются основной причиной повышенного интереса к ним. Так, в работах [1, 2] изучены особенности структуры и свойств технически чистого титана в субмикроструктурном состоянии. В работах [3, 4] рассмотрены основные методы получения в материалах субмикроструктурной структуры. В работах [5, 6] на основании исследования структуры и свойств выполнен анализ возможности применения материалов в субмикроструктурном состоянии для деталей авиационной техники. В работах [1, 4, 7] приведены результаты исследования применения метода винтовой экструзии для формирования субмикроструктурной структуры в объемных материалах.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению структуры и свойств металлов и сплавов после ИПД, в настоящее время исследования, направленные на разработку методик оптимизацию штамповой оснастки для реализации процесса деформирования, ограничены.

Важной задачей на сегодняшний день является разработка новых и совершенствование существую-

щих методов ИПД с целью получения субмикроструктурной структуры для широкой номенклатуры сталей и сплавов. Так, при деформации сложнолегированных сплавов, например, таких как двухфазные сплавы на основе титана, возникают проблемы с выбором рациональных условий и режимных параметров процесса: размеров исходного образца, температуры, степени деформации за один цикл, общего количества циклов деформации и т. д. При выборе нерациональных условий обработки не удается одинаково хорошо прорабатывать структурные элементы сплава во всех сечениях образца. Высокая температура образца не способствует фрагментации структуры и формированию высокоугловых границ зерен, в то время как слишком низкая температура приводит к разрушению образца. В связи с этим в настоящее время номенклатура металлов и их сплавов, в которых удалось сформировать субмикроструктурную структуру, является весьма ограниченной. Аналогичные трудности возникают и при обработке образцов, полученных по перспективной энергосберегающей технологии путем синтеза из металлических порошков [8].

Основными сложностями при разработке технологии ИПД является большое количество факторов, влияющих на реализуемость процесса и качество получаемых образцов. Для оптимизации некоторых из них необходимо проведение опытных работ. Однако параметры, связанные с напряженно-деформированным состоянием (НДС) образца, могут

быть успешно определены с использованием современных методов моделирования.

Большое разнообразие существующих и применяемых в настоящее время методов ИПД в первую очередь объясняется особенностями НДС реализуемого в образце, а также рядом технологических решений. Широко используемый в последнее время метод интенсивной пластической деформации, разработанный и исследуемый в Донецком физико-техническом институте группой под руководством Я. Е. Бейгельзимера [1], заключающийся в том, что призматический образец циклично деформируют в матрице с винтовым каналом постоянного поперечного сечения, закрученного под углом  $\beta$  (рис. 1).

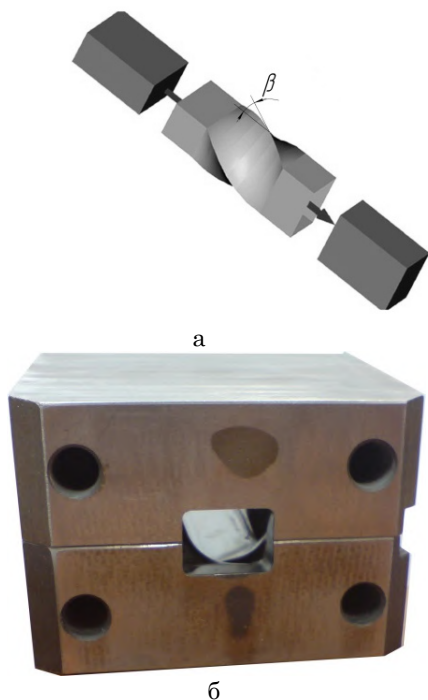


Рисунок 1 – Схема интенсивной пластической деформации призматических образцов методом винтовой экструзии (а) и общий вид разъемной матрицы (б)

Учитывая основные особенности метода винтовой экструзии (ВЭ), его использование является перспективным для получения заготовок из сложнолегированных сплавов, а также порошковых заготовок для изготовления деталей газотурбинных двигателей [4, 6]. Напряженно-деформированное состояние для произвольной точки образца в винтовом канале определяется шаровой и девиаторной составляющими полного тензора напряжений. Высокие значения шаровой компоненты приближает условия деформации к гидростатическому сжатию, что предотвращает разрушение образца. Девиаторная составляющая способствует реализации простого сдвига в плоскости деформации, приводящего к фрагментированию и перемешиванию структуры, а также залечиванию пористости в образцах, синтезированных из смеси порошковых компонентов методами порошковой металлургии [9].

Технически уровень шаровой компоненты НДС определяется величиной противодействия, прикла-

дываемого к торцу образца в процессе ВЭ. Девиаторная составляющая определяется особенностями геометрии винтового канала. Таким образом, эффективность реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии зависит от мероприятий, направленных на сохранение целостности образца. Учитывая, что девиатор напряжений в различных сечениях образца определяется исключительно конструктивными особенностями винтового канала, образованного частями винтовой матрицы, его оптимизация является важной задачей при разработке технологии ИПД новых материалов с целью формирования в них однородной субмикроструктурной структуры и устранению пористости в порошковых заготовках.

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики оптимизации геометрических параметров винтового канала матрицы для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии. Для достижения цели необходимо решить круг задач, связанных с разработкой методики приложения начальных и граничных условий на деформируемый образец, анализа полей напряжений и деформаций в зависимости от геометрии образца и условий деформирования, а также оценки адекватности.

Необходимость оптимизации геометрических параметров винтового канала связана с особенностями условий, необходимых для реализации процессов перемешивания, фрагментации структуры и залечивания пористости в некомпактных материалах в зависимости от состояния образцов. Оценка и оптимизация НДС особенно важны для образцов, синтезированных из металлических порошков, в связи с необходимостью соблюдения условий сохранения их целостности при каждом цикле деформации.

Приведенные в работе [1] результаты по деформации чистых металлов и технических сплавов с использованием винтовой матрицы, спроектированной на основе результатов физического моделирования процесса течения металла, подтверждают эффективность применения ВЭ. Так, в образце из сплава ВТ1-0 после пяти циклов деформации при температуре 400 °С наблюдалось дробление зерен и гомогенизация структурных составляющих (рис. 2), сопровождающиеся увеличением доли высокоугловых границ и повышением уровня функциональных свойств [6].

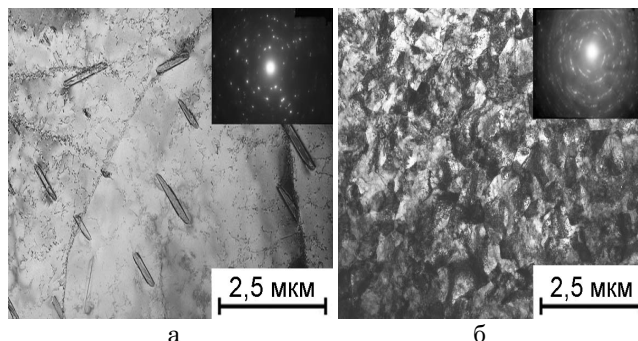


Рисунок 2 – Микроструктура образца из сплава ВТ1-0 в исходном (литом) состоянии (а) и после ВЭ (б) (просвечивающий электронный микроскоп JEM-100CXII)

В ряде случаев попытки деформации титановых образцов винтовой экструзией приводили к разрушению образцов на первом или последующих циклах (рис. 3). Наблюдалась значительная разнотернистость в центральной и периферийных зонах образцов. Причиной разрушения и разнотернистости являлось неблагоприятное сочетание параметров ИПД. Например, к разрушению образцов может приводить недостаточная величина противодавления, а причиной появления разнотернистости – недостаточное количество циклов деформации. В случае применения винтовой матрицы неразъемного типа разрушение в ней образца может приводить к полному выходу из строя дорогостоящей оснастки.

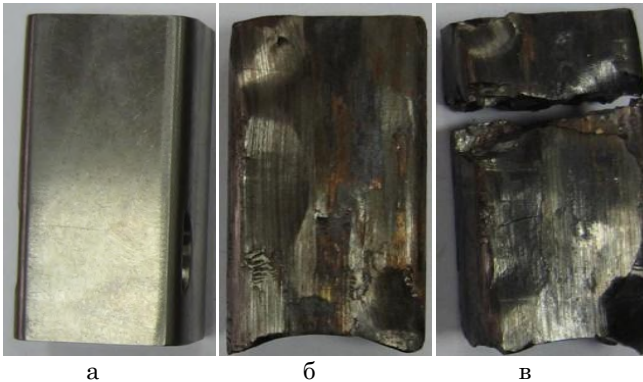


Рисунок 3 – Образец из сплава ВТ1-0 до (а) и после деформации (б), а также разрушившийся в процессе винтовой экструзии (в)

Для исключения подобных явлений и получения гомогенной субмикроструктурной структуры во всем объеме образца необходимо соблюдение с учетом свойств деформируемого сплава и размеров образца ряда условий [1]. Так, необходимо наличие касательных напряжений достаточных для дробления структурных элементов, а также зон «перетекания» материала в пределах поперечного сечения образца, достаточной для гомогенизации структуры. Выполнение этих условий возможно за счет оптимизации конструктивных параметров винтовой матрицы, которую с учетом ее стоимости эффективно выполнять численными методами.

Моделирование НДС выполнялось для стадии установившейся деформации образца методом конечных элементов (КЭ) в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Использовались твердотельные тетрагональные прочностные КЭ, позволяющие задавать степени свободы для узлов в виде угла поворота относительно оси. Количество КЭ в основной части модели образца составляет 20 - 25 тысяч при общем количестве КЭ порядка 30 - 40 тысяч.

Для описания модели материала, учитывая большие деформации, возникающие в образце, использовался метод задания кривой текучести материала в табличной форме в виде «деформация-напряжение», экспериментально установленной для моделируемого материала. Использовались температурно-зависимая и независимая от температуры модели материала. В первом случае выполнялся предварительный расчет теплового поля образца с учетом теплообмена между торцовыми поверхностями и контробразцом, а также между боковыми по-

верхностями и поверхностью канала с учетом смазки. При моделировании НДС образцов материал считали несжимаемым, трение о стенки канала не учитывалось, взаимное проникновение материала и оснастки исключалось.

В качестве кинематических граничных начальных условий использовались углы поворота узлов конечно-элементной модели, принадлежащих нижней и верхней торцовым плоскостям образца. Угол поворота верхней плоскости задавался равным конечному углу разворота верхнего торца образца в матрице (рис. 1а). Конечный угол разворота поперечного сечения образца является параметром, определяющим величину деформации за один цикл и может варьироваться в широких пределах.

Для исключения влияния условий закрепления образца по торцовым плоскостям, обусловленным принципом Сен-Венана, расчетная модель имела три зоны, включающие основной образец с обеих торцов, окруженный фальш-образцами (рис. 4). При такой модели формы удалось получить неискаженную картину НДС вблизи торцевых поверхностей исследуемого образца.

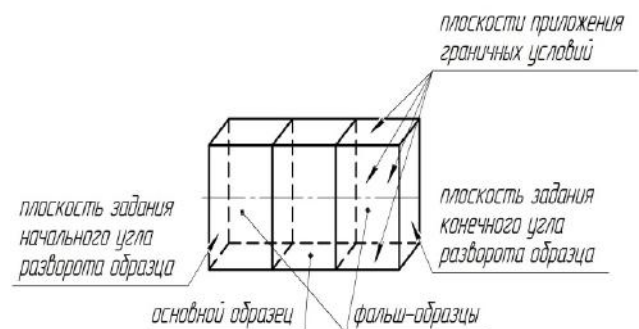


Рисунок 4 – Схема расчетной модели образца для моделирования НДС

Нагружение образца выполнялось путем задания угла поворота относительно центральной оси узлов конечных элементов, принадлежащих боковым плоскостям. Предварительные исследования различных моделей нагружения показали, что выбранная модель максимально приближена к условиям деформации образца при прохождении через винтовой канал матрицы (рис. 4).

Угол разворота винтового канала относительно центральной оси задавали в виде функции (1):

$$\alpha = f(y), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – расчетное значение угла поворота узлов конечно-элементной модели,  $y$  – расстояние от торца закрепления образца, мм.

Зависимость (1) может принимать произвольный вид (рис. 5), что позволяет выполнять оптимизацию геометрии винтового канала по различным критериям (например, максимальной величине девиатора напряжений, максимальной деформации), а также градиентов их изменения. Для оптимизации могут быть использованы различные методы первого и второго порядков.

При моделировании в системе ANSYS функцию (1) задавали в виде полинома, удовлетворяющего

кинематическим граничным условиям, протабулированного в интервале  $L_H - L_K$ , где  $L_H, L_K$  - соответственно координаты начала и конца винтового канала в продольном направлении.

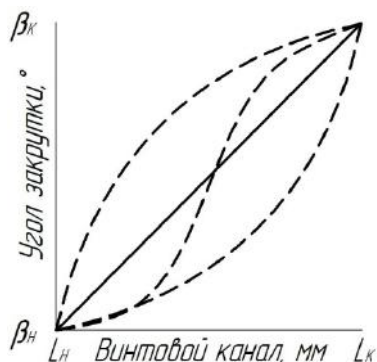


Рисунок 5 – Варианты функций нагружения образца при ВЭ:

$L_H, L_K$  – координаты начала и конца винтового канала в продольном направлении;

$\beta_H, \beta_K$  – начальный и конечный углы закрутки

Примером зависимости (1) является полином вида

$$\alpha(y) = \sum_{n=1}^N \left( \beta_H \frac{L_K - y}{L_K - L_H} + \beta_K \frac{y - L_H}{L_K - L_H} \right)^n \quad (2)$$

Расчет НДС выполнялся с учетом нелинейных эффектов, вызванных наличием больших деформаций в образце. На всех этапах моделирования использовались APDL-скрипты, позволяющие существенно упростить процедуру подготовки и получения решения.

Разработка и апробация технологии оптимизации геометрических параметров винтового канала и образцов выполнялись для призматических образцов, имеющих различное соотношение сторон. Исследовались образцы с квадратным (20x20) мм и прямоугольным (20x40) мм сечениями. Конечный угол поворота торцового сечения образца задавался равным 90°. Закон изменения угла закрутки канала – линейный. Свойства материала образца соответствуют титановому сплаву ВТ1-0.

Анализ распределения касательных напряжений в различных сечениях образцов при прохождении винтового канала (рис. 6), эквивалентных деформаций (рис. 7) и векторов перемещений (рис. 8) в различных сечениях образцов позволяет выполнить оценку эффективности применения рассматриваемой схемы деформации.

Максимальный уровень напряжённого состояния образцов достигается в верхней и нижней плоскостях винтового канала в периферийной части образцов (рис. 6, 7). В центральной части призматических образцов независимо от соотношения сторон наблюдается слабдеформированная область (рис. 7а, б).

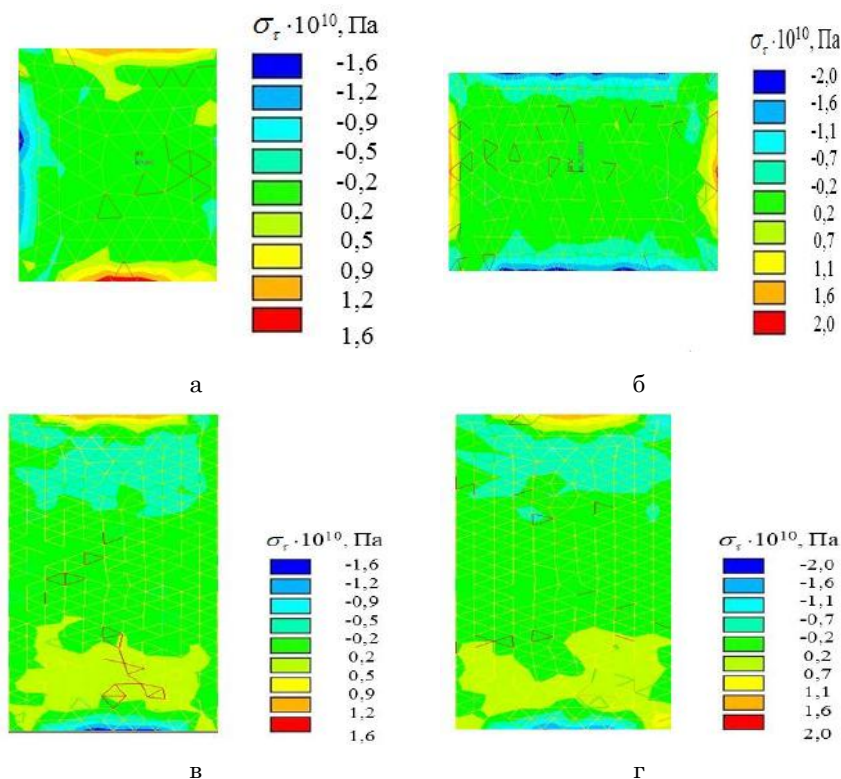
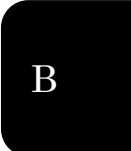


Рисунок 6 – Изолинии касательных напряжений в различных сечениях образцов: поперечное сечение образца квадратного (а) и прямоугольного (б) профилей; продольное сечение образца квадратного (в) и прямоугольного (г) профилей



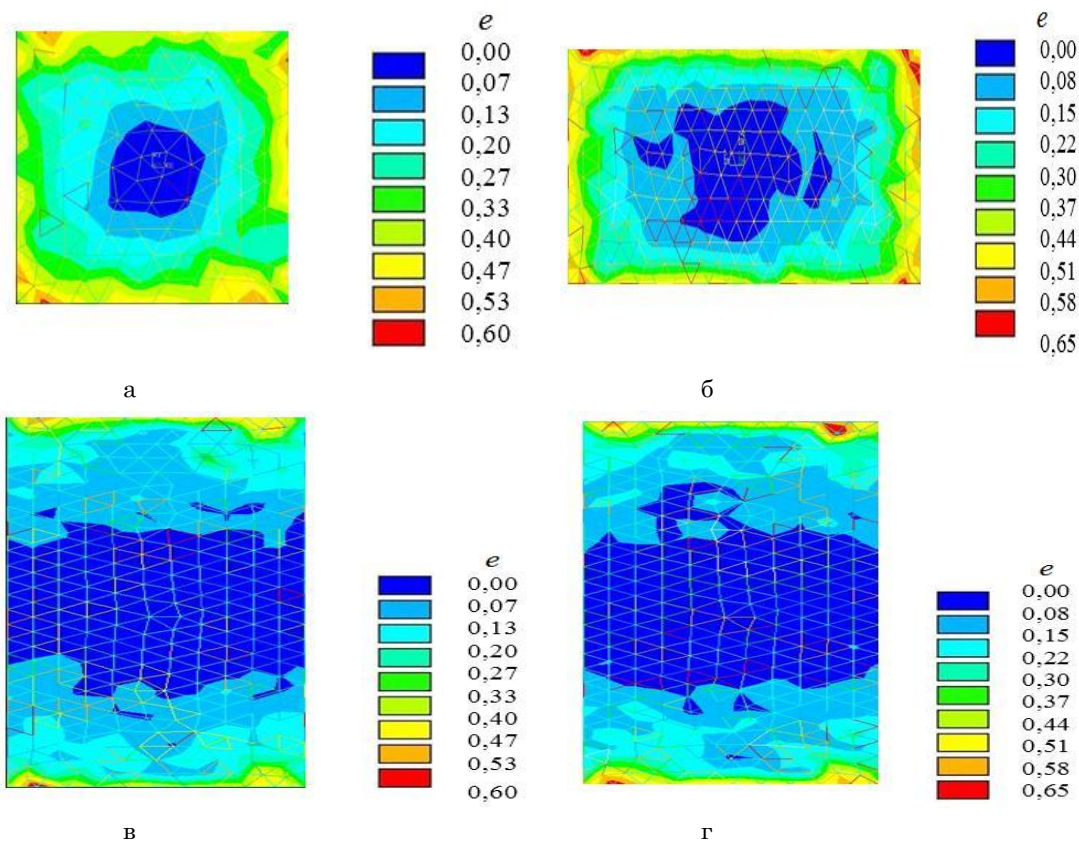


Рисунок 7 – Изолинии эквивалентных деформаций в различных сечениях образцов: поперечное сечение образца квадратного (а) и прямоугольного (б) профилей; продольное сечение образца квадратного (в) и прямоугольного (г) профилей

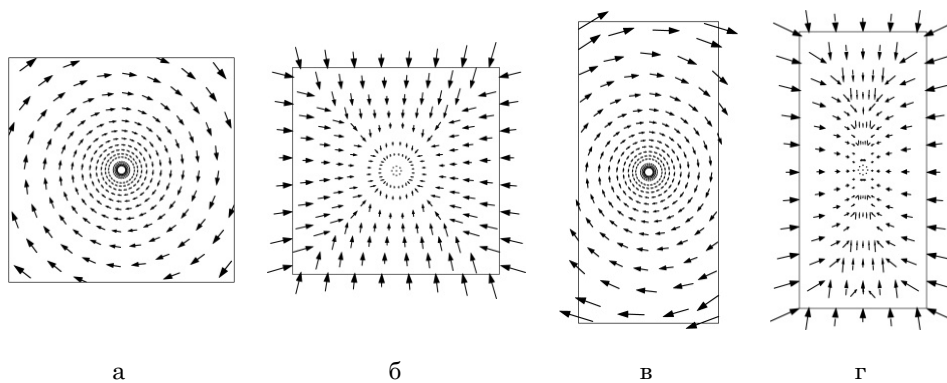


Рисунок 8 – Векторное поле перемещений точек поперечного сечения образцов с квадратным (а) и прямоугольным (б) сечениями

Наличие в центре образцов вблизи нейтральной линии зоны, в которой напряжения и деформации могут на порядок отличаться от аналогичных значений для периферийных зон, является основным недостатком экструзии призматических образцов. При этом, теоретически, степень проработки структуры материала будет различна, что способствует увеличению рассеяния величины механических свойств по сечению образцов, подверженных ВЭ. Оценка НДС образцов различного сечения численным методом позволяет выполнять оптимизацию поперечного сечения по критериям деформации центральной и периферийной зон.

Практический опыт деформации призматических образцов винтовой экструзией показывает, что при увеличении количества циклов деформации структура образцов прорабатывается по всему поперечному сечению [10], что является следствием диффузии и наличия вихрей в плоскости деформации [11, 12].

Установленное поле распределения эквивалентных деформаций по высоте винтового канала матрицы указывает на то, что максимальное значение деформации достигается на начальном и конечном участках винтового канала (рис. 9). В средней части канала происходит «перетекание» материала в пределах поперечного сечения, способствующее явлению

перемешивания структуры, что является особенно важным при деформации сложнoleгированных сплавов и порошковых образцов, обеспечивая гомогенизацию легирующих элементов по сечению образца.

Наибольшие поперечные перемещения и, следовательно, наиболее благоприятные условия для гомогенизации возникают в образце прямоугольного сечения.

Наблюдаемая осцилляция расчетных значений связана с несовпадением пути, вдоль которого определяют значения НДС с узлами КЭ. В результате на участках пути, проходящих между узлами КЭ, расчетные значения НДС определяются путем интерполяции по соседним узлам.

Для уменьшения эффекта осцилляции может быть использована конечно-элементная модель, содержащая большое количество КЭ.

Аналогичные распределения компонентов напряженного и деформированного состояний могут быть получены для произвольного сечения образцов. Результаты моделирования деформированного состояния образцов в процессе винтовой экструзии хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, полученных авторами работы [7], что свидетельствует об адекватности применяемой методики численного эксперимента.

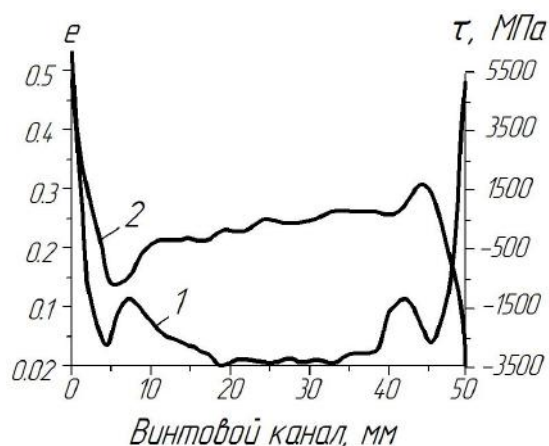


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных деформаций (1) и касательных напряжений (2) вдоль боковой поверхности образца квадратного сечения

Результаты моделирования показали, что разработанная методика является эффективной для оптимизации параметров винтового канала при проектировании матриц для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии.

В результате ее применения возможно выполнение оптимизации профиля винтового канала, установление закономерностей изменения угла закрутки, а также интенсивности и абсолютной величины касательных напряжений и деформаций. При этом необходимо учитывать физические и механические свойства, закономерности деформационного упрочнения и величины напряжений, приводящие к дроблению структурных элементов конкретного сплава. Легко определяемая методом конечных элементов энергия деформации образцов может быть использована для расчета необходимого усилия деформирования с учетом сечения канала, закономерностей изменения угла закрутки вдоль винтовой линии, а также физических свойств деформируемых материалов. Результаты моделирования позволяют также определять степень предварительной деформации заготовок деталей, изготавливаемых из деформированных винтовой экструзией полуфабрикатов, в зависимости от места их вырезки, что необходимо учитывать при их дальнейшей обработке.

Перспективами дальнейших исследований в направлении усовершенствования разработанной методики являются работы, направленные на установление оптимальных с точки зрения энергосиловых параметров закономерностей угла закрутки винтового канала и геометрии образцов.

## Optimization technique of the matrix channel for twist extrusion

D. V. Pavlenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo Str., Zaporizhia, Ukraine, 69063

Submicrocrystalline formation condition in billets of metals and their alloys is possible by intensive plastic deformation (IPD) by twist extrusion. Successful implementation of IPD for alloys of different classes can be set at the optimum combination of process parameters. Attempts to implement IPD prismatic billets made of titanium alloys empirically often led to the blanks destruction or inadequate level of fragmentation patterns. The purpose was to develop and test methods of numerical modeling of the stress-strain state of billets during IPD twist extrusion.

Developed technology describes the basic steps of the numerical simulation state blanks depending on important parameters such as the geometry of the preform and the amount of back pressure of the screw channel twist law, and others. Its implementation allows to set the operating parameters of the process in which there is a uniform structure throughout the fragmentation amount of timber without destroying it. Determined by the energy required to implement IPD billets depending on their geometry, temperature,

geometry of the screw channel and a number of process parameters, can count on the need to strengthen the stem press. The simulation results allow to determine the degree of pre-strain for parts made from deformed screw extrusion billets, depending on their place of scraps given the uneven deformation of the cross section of prismatic billets. On the example of blanks square and rectangular cross-section shows the distribution of the shear and equivalent stresses along the screw channel in different sections. The results of modeling the fields of stress and strain distributions in different sections of the billets are obtained. Thus, modeling method in conjunction with the methods of experimental design and optimization of the objective functions was developed, enables the optimization of operating parameters of IPD pieces of metallic materials in order to obtain submicrocrystalline structure.

**Keywords:** intensive plastic deformation, twist extrusion, finite element method, submicrocrystalline.

## Методика оптимізації каналу матриць для гвинтової екструзії

Д. В. Павленко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063*

Розглянуто методику визначення напружено-деформованого стану зразка, підданого інтенсивній пластичній деформації методом гвинтової екструзії. Показана можливість використання методу кінцевих елементів для оптимізації технологічного оснащення під час реалізації процесу гвинтової екструзії.

Результати моделювання показали, що розроблена методика є ефективною для оптимізації параметрів гвинтового каналу під час проектування матриць для реалізації процесу ПД методом гвинтової екструзії. Внаслідок її застосування можливі виконання оптимізації профілю гвинтового каналу, встановлення закономірностей зміни кута закрутки, а також інтенсивності та абсолютної величини дотичних напружень і деформацій.

**Ключові слова:** інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, метод кінцевих елементів, субмікрористалічна структура.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
2. Ткач Д. В. Особенности структуры и разрушения титана марки VT1-0 в субмикрористаллическом состоянии при циклическом нагружении / Д. В. Ткач, Д. В. Павленко, В. Е. Ольшанецкий // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2011. - № 1. – С. 11–18.
3. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров – М.: Академкнига, 2007. – 397 с.
4. Beygelzimer Y. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // Materials Science and Engineering – A 503 (2009). - P. 14–17.
5. Утяшев Ф. З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении / Ф. З. Утяшев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. □ № 10 (67). □ С. 7 – 11.
6. Павленко Д. В. Применение винтовой экструзии для получения субмикрористаллической структуры и гомогенизации титанового сплава VT3-1 / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др. // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185 – 188.
7. Beygelzimer Y. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokofeva, R. Kulagin // Journal of materials processing technology. – 2009 (2009). – P. 3650 – 3656.
8. Павленко Д. В. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Е. Капустян, А. А. Скребцов // Титан. – 2013. – № 1. – С. 24 – 32.
9. Павленко Д. В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов / Д. В. Павленко // Технологические системы. – 2013. – № 4(65) – С. 21 – 29.
10. Ольшанецкий В. Е. Деформационное поведение титана VT1-0 с субмикрористаллической структурой, полученной методом винтовой экструзии / В. Е. Ольшанецкий, Л. П. Степанова, В. Л. Грешта и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 11. □ С. 29 – 33.
11. Beygelzimer Y., Lavrinenko N. Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries [Электронный ресурс] / Y. Beygelzimer, N. Lavrinenko Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206/1206.5055.pdf>
12. Beygelzimer Y. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity / Y. Beygelzimer, A. Reshetov // Ultrafine Grained Materials. – 2006. – № 4. - P. 119 – 124.

## REFERENCES

1. Bejgel'zimer Ja. E. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii / Ja. E. Bejgel'zimer, V. N. Varjuhin, D. V. Orlov. – Doneck : TEAN, 2003. – 87 s.
2. Tkach D. V. Osobennosti struktury i razrushenija titana marki VT1-0 v submikrokristallicheskom sostojanii pri ciklicheskom nagruzenii / D. V. Tkach, D. V. Pavlenko, V. E. Ol'shanec'kij // Novye materialy i

tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. – 2011. №1. – S. 11–18.

3. Valiev R.Z. Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svojstva / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov – M.: Akademkniga, 2007. – 397 s.

4. Beygelzimer Y. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering –A* 503 (2009). □ R. 14 – 17.

5. Utjashev F.Z. Deformacionnye metody poluchenija nanostrukturirovannyh materialov i vozmozhnosti ih ispol'zovanija v aviadvigatelistroenii / F.Z. Utjashev // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. – 2009. – № 10 (67). – S. 7–11.

6. Pavlenko D.V. Primenenie vintovoj jekstruzii dlja poluchenija submikrokristallicheskoj struktury i gomogenizacii titanovogo splava VT3-1 / D.V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov, A.Ja. Kachan i dr. // *Vestnik dvigatelestroenija*. – 2007. – №2. – S. 185 – 188.

7. Beygelzimer Y., Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin // *Journal of materials processing technology*. – 2009. – R. 3650 – 3656

8. Pavlenko D.V. Poluchenie deformirovannyh zagotovok iz titanovyh splavov na osnove metodov poroshkovoj metallurgii / D. V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov, A.E. Kapustjan, A.A. Skrebcov // *Titan*. –2013. – №1. – S. 24 – 32.

9. Pavlenko D.V. Materialovedcheskie aspekty resursoberegajushhej tehnologii poluchenija titanovyh polufabrikatov / D.V. Pavlenko // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2013. – №4(65) – S. 21 – 29.

10. Ol'shaneckij V.E. Deformacionnoe povedenie titana VT1-0 s submikrokristallicheskoj strukturoj, poluchennoj metodom vintovoj jekstruzii / V. E. Ol'shaneckij, L. P. Stepanova, V. L. Gresha i dr. // *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. – 2013. – №11. □ S. 29 – 33.

11. Beygelzimer Y., Natalia Lavrinenko Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries [Elektronnyj resurs] / Y. Beygelzimer, N. Lavrinenko Rezhim dostupa: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206/1206.5055.pdf>

12. Beygelzimer Y. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity / Y. Beygelzimer, A. Reshetov // *Ultrafine Grained Materials*. – 2006. – №4 □ P. 119 – 124.