

PACS: 81.20.Ev, 81.40.-z

А.В. Спусканюк

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗАГОТОВКЕ ПОСЛЕ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72  
E-mail: spusk@ukr.net

Статья поступила в редакцию 8 августа 2003 года

*Метод конечных элементов (МКЭ) использован для анализа деформированного состояния заготовки в процессе винтовой экструзии. Приведено распределение интенсивности деформаций по прямоугольному поперечному сечению профиля. Показано, что интенсивности деформаций ниже, чем значения, определяемые по известным формулам.*

В последние годы интенсивно развиваются научные исследования и разрабатываются технологии получения материалов с субмикро- и наноструктурами, отличающихся уникальными физико-механическими свойствами. Одно из перспективных направлений таких разработок – управляемое изменение структуры и свойств исходных заготовок путем накопления интенсивных пластических деформаций методами равноканальной экструзии. Эффективным методом накопления деформаций в заготовке является винтовая экструзия, при которой материал многократно продавливают через матрицу с винтовым каналом [1].

Поскольку эволюция структуры и свойств деформируемого материала определяется, главным образом, условиями и величиной накопленной деформации, весьма актуальна задача правильного учета уровня и характера распределения степени деформации по объему заготовки. Разработаны математические модели процесса винтовой экструзии, позволяющие оценить распределение деформаций в заготовке [1,2]. Согласно приближенной оценке, полученной на основании предположения о «винтовом» течении металла, интенсивность деформации линейно растет от нуля в центре поперечного сечения деформированной заготовки до максимального значения

$$\varepsilon_{i \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \beta_{\max} \quad (1)$$

в наиболее отдаленных от центра участках (здесь  $\beta_{\max}$  – максимальное зна-

чение угла наклона винтовой линии к оси экструзии). При учете «перетекания» материала, т.е. движения материальных точек внутри контура поперечного сечения, расчетные значения отражают некоторое выравнивание деформации по сечению, но приведенная формула по-прежнему используется для оценки максимальной величины интенсивности деформации за один проход винтовой экструзии. Интенсивность «перетекания» материала увеличивается при  $a/b \rightarrow 1$ , где  $a$  и  $b$  – размеры профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях. С учетом «перетекания» металла наибольшие и наименьшие значения интенсивности деформации после одного прохода при  $40^\circ < \beta < 60^\circ$  и  $0.5 < a/b < 0.8$  определены в виде [1]:

$$\varepsilon_{i \max} = \operatorname{tg} \beta_{\max}; \quad \varepsilon_{i \min} = 0.4 + 0.1 \operatorname{tg} \beta_{\max}. \quad (2)$$

Для анализа параметров процесса винтовой экструзии использован пакет прикладных программ ANSYS 6.0, с помощью которого можно моделировать пластическую деформацию заготовки методом конечных элементов. В рамках данных программ была построена конечно-элементная модель процесса винтовой экструзии, позволяющая моделировать пластическое течение заготовок произвольных форм при разнообразных параметрах процесса. Это предоставляет возможность определять оптимальные параметры матрицы для достижения необходимого изменения структуры и свойств материала, в частности обеспечения более однородного распределения структуры и свойств по сечению заготовки.

Для иллюстрации возможностей метода в данной работе приведены результаты моделирования распределения деформаций по сечению одного из профилей и сопоставление их с расчетными оценками по соотношениям (1), (2). Форма канала матрицы для винтовой экструзии заготовки прямоугольного поперечного сечения представлена на рис. 1. Соотношение размеров сторон сечения соответствовало  $a/b = 15/25$ , при этом ось матрицы совпадала с центром симметрии прямоугольного профиля. Поперечное сечение заготовки перпендикулярно к направлению экструзии и остается постоянным вдоль канала. Угол наклона винтовой линии к направлению оси экструзии изменялся

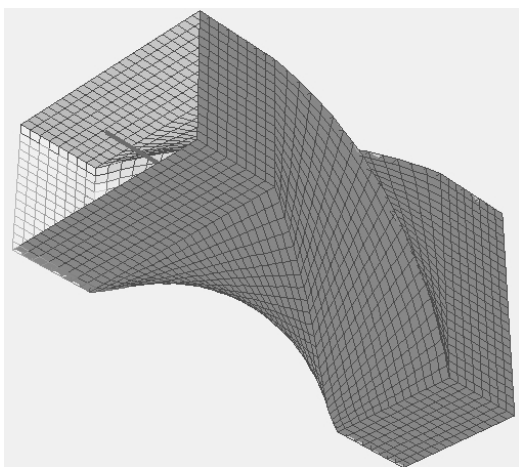


Рис. 1. Форма канала матрицы

по высоте матрицы, на начальном и конечном участках  $\beta = 0$ , а его максимальное значение  $\beta_{\max} = 60^\circ$ . Угол поворота прямоугольника относительно оси экструзии составлял  $\rho = 90^\circ$ . Исследован процесс винтовой экструзии медных заготовок с учетом упрочнения материала, зависимость напряжения пластического течения от степени деформации аппроксимирована выражением с использованием справочных данных [3].

Рис. 2 иллюстрирует характер

распределения деформаций в объеме заготовки на различных стадиях ее прохождения через винтовой канал матрицы. Видно, что на всех стадиях распределение деформаций по поперечному сечению заготовки весьма неравномерно. В начальной стадии процесса развивается пластическая деформация металла в двух углах поперечного сечения, причем по окончании экструзии именно в этих участках зафиксирован максимальный уровень интенсивности деформаций.

Для более наглядного представления о деформированном состоянии заготовки на рис. 3 представлены сетка разбиения заготовки на конечные 10-узловые тетрагональные элементы и характерные точки в ее поперечном сечении, а на рис. 4 приведено изменение распределения интенсивности

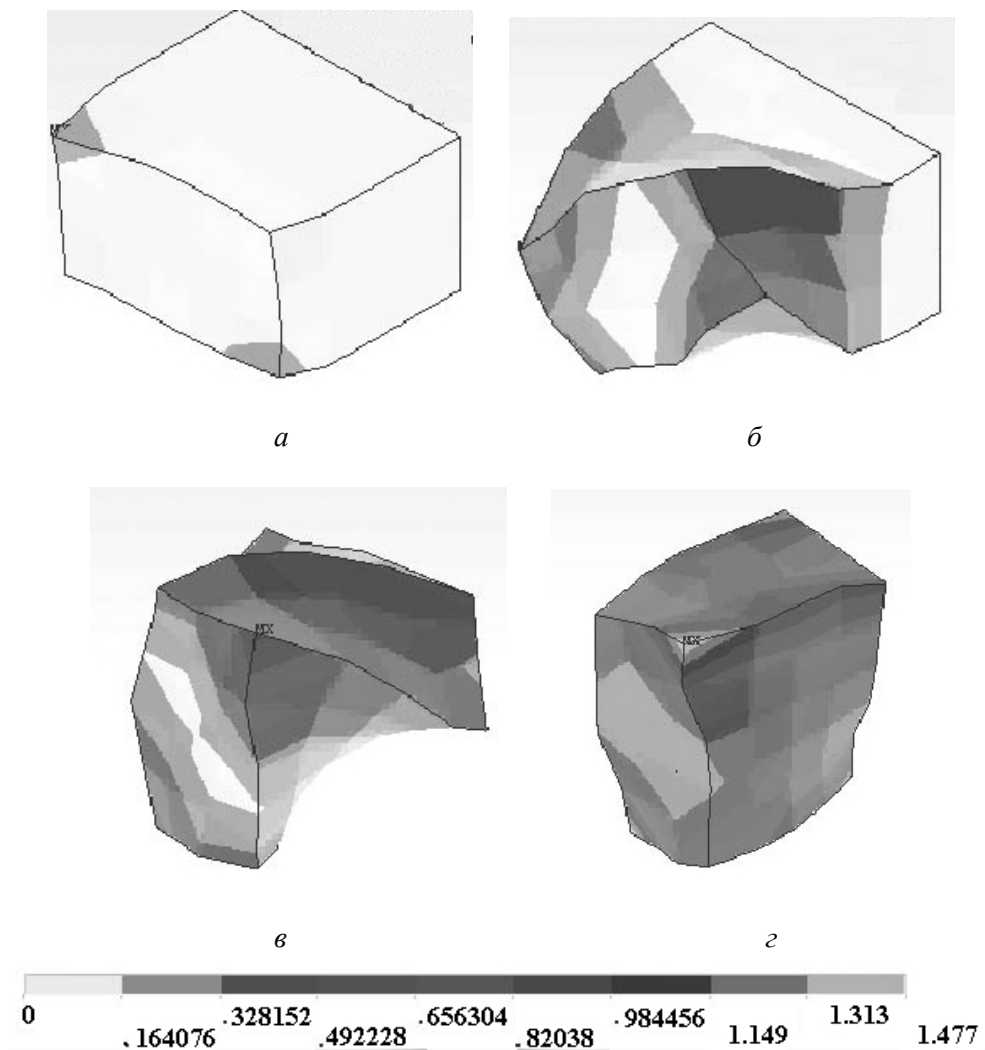


Рис. 2. Деформированное состояние заготовки на начальной (а), промежуточных (б, в) стадиях и после экструзии (г)

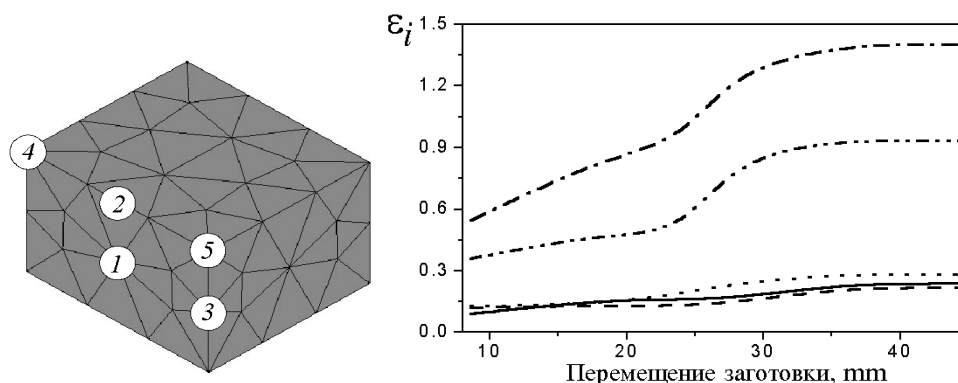


Рис. 3. Сетка разбиения заготовки на конечные элементы и характерные точки 1–5

Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций в характерных точках заготовки: 1 (—), 2 (---), 3 (···), 4 (- · -), 5 (- - -)

деформаций  $\varepsilon_i$  в этих точках по мере перемещения заготовки в канале. Наибольший уровень  $\varepsilon_i$  наблюдается в точке 4, меньший, но довольно значительный – в точке 5 поперечного сечения. Модель отражает известную закономерность существенного возрастания  $\varepsilon_i$  при прохождении заготовки через крайние участки канала матрицы, в которых осуществляется более интенсивная деформация заготовки, чем в промежуточной между ними зоне (на рис. 4 видно, что уровень  $\varepsilon_i$  более значительно повышается на выходном участке канала матрицы при перемещении примерно с 23 до 32 mm). Модель отражает также деформацию металла на оси симметрии профиля (точка 1), причем уровни  $\varepsilon_i$  в точках 1–3 различаются незначительно. Несмотря на развитие деформации металла в зонах заготовки вблизи оси экструзии, уровни  $\varepsilon_i$  в различных участках поперечного сечения весьма значительно отличаются. Так, соотношение  $\varepsilon_i$  в точках 4 и 1 составляет около 6, а в точках 5 и 1 – около 4.

Компьютерный эксперимент показал также, что уровни  $\varepsilon_i$ , определенные МКЭ и по приведенным выше расчетным соотношениям, существенно различаются, причем компьютерная модель прогнозирует меньшие значения интенсивности деформаций заготовки. В данном случае величина  $\varepsilon_{i\max}$ , определенная МКЭ, ниже рассчитанной по формуле (1) примерно на 30%, по формуле (2) – на 20%, а величина  $\varepsilon_{i\min}$  – ниже рассчитанной по формуле (2) примерно на 60%.

Эти данные свидетельствуют о возможности более точного определения уровня  $\varepsilon_i$  в различных зонах поперечного сечения заготовки при анализе влияния условий винтовой экструзии на качество получаемых изделий.

### Выводы

1. Компьютерное моделирование процесса с использованием МКЭ показало значительную неравномерность распределения интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  заготовки по ее поперечному сечению после прохождения через канал матрицы.

2. Показано, что полученное с использованием МКЭ максимальное по сечению заготовки значение  $\varepsilon_{i\max}$  на 20–30% ниже, чем уровни  $\varepsilon_{i\max}$ , определяемые по известным расчетным соотношениям. Различие значений  $\varepsilon_{i\min}$ , определенных МКЭ и по расчетным формулам, превышает 50%.

1. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, Фирма ТЕАН, Донецк (2003).
2. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, В.Г. Сынков, С.Г. Сынков, ФТВД **10**, № 1, 24 (2000).
3. В.А. Кроха, Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник, Машиностроение, Москва (1980).

*A.V. Spuskanyuk*

### STRAIN DISTRIBUTION IN A BILLET AFTER TWIST EXTRUSION

Analysis of the strained state of the billet at twist extrusion has been performed using the finite elements method. Strain rate distribution within the rectangular billet cross-section has been obtained. It is shown that the magnitude of computed strain rate is lower than the one obtained by other known relationships.

**Fig. 1.** The shape of die channel

**Fig. 2.** Strained state of the billet at the initial (*a*), intermediate (*b*, *e*) stages and after extrusion (*e*)

**Fig. 3.** Net of billet division into finite elements and characteristic points 1–5

**Fig. 4.** Strain rate distribution at characteristic points of the billet: 1 (—), 2 (— —), 3 (····), 4 (— · —), 5 (— ··· —)