PACS: 81.40.–z

О.В. Прокофьева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ КАНАЛА МАТРИЦЫ ДЛЯ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 11 июля 2007 года

Для процесса винтовой экструзии (ВЭ) получено расчетное соотношение для оценки минимальной высоты винтового участка матрицы, которая обеспечит качественное деформирование материала заготовки. Предложенная методика проиллюстрирована на примере винтовой матрицы с формой профиля, используемой на данный момент в экспериментальных исследованиях.

Введение

Винтовая экструзия – процесс обработки материалов давлением, применяющийся для преобразования их структуры. В результате обработки методом ВЭ материалы существенно улучшают свои физико-механические характеристики, а в ряде случаев приобретают новые свойства [1].

В настоящее время остаются нерешенными многие проблемы теории и технологии ВЭ. В частности, пока нет методик расчета необходимой высоты винтового участка матрицы. Применение в экспериментальных исследованиях матриц с различной длиной винтового участка (и, следовательно, углом поворота выходного сечения относительно заходного) выявило значительное влияние этого геометрического параметра на качество деформирования заготовки. Так, использование матриц с недостаточно высокими винтовыми участками приводило к слабой проработке структуры металла и плохим механическим характеристикам заготовок, тогда как применение матрицы с чрезмерно большими винтовыми участками – к завышенным значениям давления экструзии и, как следствие, к снижению стойкости инструмента.

Определение минимально необходимой и достаточной высоты эмпирическим путем является довольно трудоемкой и дорогостоящей задачей. Целесообразным представляется использование для этой цели расчетных методов, в связи с чем в данной работе получено соотношение для определения минимальной высоты винтового участка, которая обеспечит качественное деформирование материала заготовки.

Методика определения минимально необходимой высоты винтового участка матрицы

В основу модели, позволяющей определить высоту винтового участка матрицы, положим следующее допущение [2]: по мере вдавливания заготовки в винтовой канал матрицы на так называемых активных участках возникает реакция со стороны стенок канала, приводящая к скручиванию нижней части заготовки (вошедшей в винтовую часть канала) относительно верхней (находящейся в прямой заходной части). На начальной стадии процесса в винтовом канале матрицы находится еще незначительный объем материала, и величина скручивающего момента недостаточна для того, чтобы перевести в пластическое состояние все сечение заготовки. Скручивающий момент возрастает по мере продвижения заготовки по винтовому каналу и на некоторой глубине достигает значения, при котором пластическое течение охватывает уже все сечение заготовки. Как показано в работе [1], основная деформация при этом происходит в переходной зоне между прямым (заходным) и винтовым участками матрицы, и по своей схеме она близка к простому сдвигу.

После того как заготовка полностью пластически деформировалась и приняла форму винта, ее дополнительная деформация осуществляется при выходе в прямой (калибрующий) канал матрицы. При этом возникнет вторая переходная зона, в которой заготовка подвергается повторному простому сдвигу, но уже обратной направленности.

Таким образом, для обеспечения качественного деформирования материала вращающий момент, создаваемый половиной винтового участка матрицы, должен достигать критического значения:

$$M_{\mathrm{tw}}\big|_{h_{0.5}} = M_{\mathrm{cr}}\,, \tag{1}$$

при котором все сечение заготовки охватывает простой сдвиг.

Соотношение (1) определяет положение среднего сечения винтового участка матрицы $h_{0.5}$.

Исходя из симметрии задачи, рассмотрим ее в цилиндрической системе координат. Винтовая часть матрицы для ВЭ представляет собой поверхность, образованную поворотом и одновременным продвижением вдоль оси z профиля сечения канала. Форму профиля, лежащего в основании поверхности, удобно задать уравнением контура $r = f(\varphi)$, тогда уравнение винтовой поверхности $\Phi = r - f\left(\varphi \pm \dfrac{z}{R}\mathrm{tg}\beta\right) = r - f(\psi) = 0$, где знак «+» соответствует ориентации винтового канала по часовой стрелке, знак « – » – против часовой стрелки.

Величина вращающего момента, возникающего при ВЭ, может быть рассчитана как произведение плеча силы $r = f(\psi)$ на величину ее тангенциальной составляющей $\tilde{q}n_{\varphi}\mathrm{d}S$ вдоль всей боковой поверхности винтового канала матрицы:

$$M_{\mathrm{tw}} = \int\limits_{S_b} f(\psi)\tilde{q}n_{\varphi}\mathrm{d}S\,, \tag{2}$$

где $\tilde{q}$ – среднее контактное давление на активных участках матрицы, возникающее до того, как заготовка достигнет глубины $h_{0.5}$; n_φ – проекция внутренней нормали к винтовой поверхности **n** на ось φ цилиндрических координат; S_b – площадь боковой поверхности винтового канала.

Взяв соответствующие производные, по аналогии с [2] получим

$$n_\varphi = \frac{-(\mathrm{grad}\Phi)_\varphi}{\sqrt{\left(\mathrm{grad}\Phi\right)_z^2 + \left(\mathrm{grad}\Phi\right)_r^2 + \left(\mathrm{grad}\Phi\right)_\varphi^2}} = \frac{\dfrac{1}{f(\psi)}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\mathrm{tg}\beta}{R}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\dfrac{1}{f(\psi)}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2}}. \quad (3)$$

Согласно рассмотренной в [3,4] задаче о нахождении предельной нагрузки для тупого клина под действием равномерного давления выражение для $\tilde{q}$ можно представить в виде $\tilde{q} = c\sigma_T$. Значение константы $1 < c < (1 + \pi/2)$ справедливо в случае, когда деформируемый материал имеет свободную поверхность, что в применении к ВЭ соответствует отсутствию полного прилегания металла к стенкам матрицы. При полном прилегании материал будет зажат стенками матрицы, и контактное давление $\tilde{q}$ возрастет. В этом случае $c \geq (1 + \pi/2)$.

Для проведения оценочных расчетов значение константы c подбирается удовлетворяющим равенству

$$q(h_{0.5}) = c\sigma_T . \quad (4)$$

Соотношение для расчета контактного давления q получено в работе [2].

Подставим соотношение (3) в (2) и перейдем от интеграла по поверхности к двойному интегралу по координатам φ и z. Тогда выражение для вращающего момента будет иметь вид

$$M_{\mathrm{tw}} = c\sigma_T \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\dfrac{\partial f}{\partial \psi}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\mathrm{tg}\beta}{R}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\dfrac{1}{f(\psi)}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2}} \mathrm{d}S, \quad (5)$$

где dS – элемент площади винтовой поверхности в цилиндрических координатах, $\mathrm{d}S = \sqrt{f^2(\psi)\left(1 + \left(\dfrac{\mathrm{tg}\beta}{R}\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2\right) + \left(\dfrac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2}\,\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}z$.

При достижении вращающим моментом своего критического значения все сечение заготовки будет охвачено простым сдвигом. Исходя из этого, можно записать

$$M_{\mathrm{cr}} = \int_{S_{\mathrm{prof}}} f(\varphi) K \mathrm{d}S, \quad (6)$$

где K – интенсивность касательных напряжений; S_{prof} – площадь сечения винтового канала матрицы.

Согласно условию пластичности Мизеса примем $K = \dfrac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$ и перейдем в (6) к двойному интегралу заменой $\mathrm{d}S = r\mathrm{d}r\mathrm{d}\varphi$, так как интегрирование в данном случае ведется по плоскости сечения. Тогда

$$M_{\text{cr}} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \int\limits_0^{2\pi} \int\limits_0^{f(\varphi)} r^2 \mathrm{d}r\mathrm{d}\varphi = \frac{\sigma_T}{3\sqrt{3}} \int\limits_0^{2\pi} f^3(\varphi)\mathrm{d}\varphi\,. \tag{7}$$

Согласно сказанному выше $2h_{0.5}$ (где $h_{0.5}$ – высота, на которой выполняется равенство моментов (5) и (7)) представляет собой минимально необходимую и достаточную высоту винтового участка канала матрицы.

Методика определения минимальной высоты предполагает такую последовательность операций:

1) определение $h_{0.5}$ из условия равенства моментов, рассчитанных по формулам (5) и (7) для произвольного значения константы c;

2) расчет среднего контактного давления $q(h)$ для матрицы с высотой винтового участка, равной $h = 2h_{0.5}$, по соотношениям из работы [2];

3) проверка выполнения условия (4), и в случае невыполнения – повторение пункта 1 для нового значения константы c.

Расчет высоты винтового участка матрицы для конкретных форм его профиля

Предложенная методика была применена для расчета $h_{0.5}$ винтовой матрицы с формой профиля, которая используется в настоящее время в экспериментальных исследованиях [5–7]. При этом брались следующие исходные данные: размеры профиля 18 × 28 mm; угол наклона винтовой линии $\beta = 60°$; коэффициент трения $\mu \approx 0.3$ [7]; коэффициент пластического трения $\mu_{\text{pl}} \approx 0.15$ [8]. Для оценки использовано приближение идеально пластического тела $\sigma_S = \sigma_T$ при $\sigma_T = 260$ MPa.

Для примера на рисунке приведен график, иллюстрирующий определение минимальной высоты канала на основе выполнения условия равенства моментов – вращающего и критического. Результат получен в программной среде MatLab реализацией алгоритмов численного интегрирования. Точка пересечения кривых на графике соответствует искомой величине $h_{0.5} = 6.2$ mm, следовательно, минимально необходимая высота винтового канала составляет 12.4 mm. Отсюда можно заключить, что эмпирическое значение $h = 17$ mm, которое на данный момент имеют винтовые матрицы данного профиля, является достаточным для реализации деформации по схеме простого сдвига, однако может быть уменьшено. Результат получен при значении константы $c = 3.2$ (точность выполнения условия (4) $\approx 10^{-3}$), что свидетельствует о достижении в процессе ВЭ полного прилегания материала к стенкам матрицы. Среднее контактное давление соответственно $q = 3.2\sigma_T$.

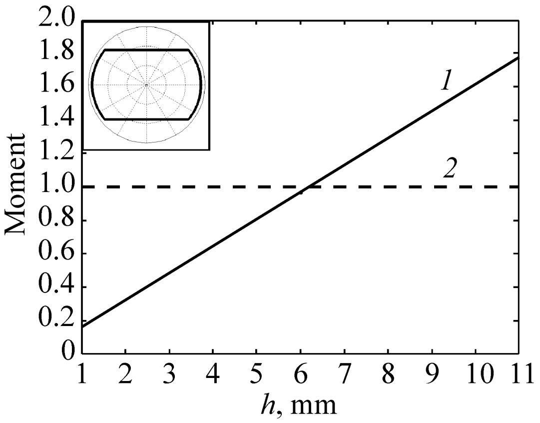

Рис. Зависимость нормированных на M_{cr} моментов: *1* – вращающего и *2* – критического от глубины продвижения заготовки в винтовой канал h для формы профиля, представленной на вставке

Аналогичный расчет минимально необходимой высоты при совпадающих исходных параметрах был проведен для двух других форм профиля, рассмотренных в работе [2]. Первый из них, в виде двух сдвинутых друг относительно друга спиралевидных участков, характеризовался наиболее низким и равномерно распределенным контактным давлением. Расчет минимальной высоты показал, что для реализации простого сдвига в сечении такого профиля необходимы матрицы с длиной винтового участка более 40 mm (угол поворота выходного сечения относительно заходного порядка 300°), что бессмысленно с технической точки зрения. Хотя величина среднего контактного давления при этом действительно будет невелика: $q = 0.9\sigma_T$. Таким образом, получил подтверждение вывод работы [2] относительно нетехнологичности данной формы профиля.

Что касается второй формы профиля из [2] в виде прямоугольника со скругленными углами, то определенные по представленной методике характеристики матрицы составили: $h \approx 8$ mm, $q \approx 2.6\sigma_T$ (значения несколько варьируются в зависимости от радиуса скругления). Этот результат еще раз подтверждает, что данная форма профиля наиболее предпочтительна с точки зрения нагрузки на инструмент, технологичности, а также экономии дорогостоящего материала для матриц.

Выводы

Предложенная методика дает теоретическое обоснование выбора высоты винтового участка матриц. Определенная эмпирически высота, которую до настоящего момента имели винтовые матрицы, является несколько завышенной и может быть уменьшена. Тем не менее расчет подтвердил, что используемые в экспериментах матрицы обладают достаточной высотой для реализации деформации по схеме простого сдвига. Уменьшение высоты винтового участка позволит снизить давление ВЭ, нагрузку на инструмент, а также расход дорогостоящего материала при производстве матриц.

1. *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, С.Г. Орлов, С.Г. Сынков*, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, ТЕАН, Донецк (2003).
2. *О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер*, ФТВД **15**, № 4, 65 (2005).

3. *Л.М. Качанов*, Основы теории пластичности, Наука, Москва (1969).
4. *А.Д. Томленов*, Теория пластического деформирования металлов, Металлургия, Москва (1972).
5. *Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков, А.В. Решетов*, Металл и литье Украины № 11–12, 57 (2005).
6. *Y. Beygelzimer, D. Orlov, A. Korshunov, S. Synkov, V. Varyukhin, I. Vedernikova, A. Reshetov, A. Synkov, L. Polyakov, I. Korotchenkova*, Solid State Phenomena **114**, 69 (2006).
7. *А.В. Решетов*, Автореф. … дисс. канд. техн. наук, ДонНТУ, Донецк (2006).
8. *Д.В. Орлов*, Автореф. … дисс. канд. техн. наук, ДонНТУ, Донецк (2003).

O.V. Prokof'eva

DETERMINATION OF CHANNEL HEIGHT FOR TWIST EXTRUSION DIE

For twist extrusion process the relation was obtained to evaluate the smallest height of twist part of die. It would provide a high-quality deformation of billet material. The offered technique was illustrated by the example of twist die with profile shape that is in use now in the experiments.

Fig. Dependence of normalized for M_{cr} moments: *1* – twist and *2* – critical on the depth of billet movement to twist channel h for the profile shape represented in the insert