

Г.А.КРОТЕНКО, НТУ „ХПИ“

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДАВЛИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

Стаття присвячена методам, завдяки яким є можливість проведення експериментальних досліджень складних процесів видавлювання, перевірки адекватності математичної моделі та точності теоретичних досліджень.

The article is devoted to methods which gives possibility experimental researches of complicated processes of squeezing, verification of adequacy of mathematical model and exactness of theoretical researches.

Введение. Теоретические методы анализа процессов обработки металлов давлением основаны на допущениях, позволяющих значительно упростить математические трудности решения задачи. Правомерность принятых допущений можно проверить только экспериментально, так как только эксперимент позволит проверить адекватность построенной математической модели, оценить точность теоретических решений и границы применимости выведенных формул для практических расчетов.

Различают поисковые экспериментальные исследования и проверочные. Проведение первых позволяет обосновать принятие тех или иных упрощающих допущений, а вторые проводятся для проверки адекватности математических моделей и оценки точности теоретических решений.

Экспериментальная проверка формул для определения деформирующих усилий обычно выполняются путем установления соответствия между теоретическими (рассчитанными по формулам) и экспериментальными данными. Для расчетов принимаем те же исходные данные, что и для эксперимента. При этом всегда встречаются с трудностями, связанными с определением истинного сопротивления деформации используемого материала и коэффициента внешнего трения пары инструмент – деформируемая заготовка. Многими исследователями установлено, что характер течения металла при выдавливании не зависит от рода материала и скорости деформирования в пределах от 0,05 до 300 мм/с. В связи с этим, в настоящем исследовании при изучении характера деформации и формоизменения широко использовали технический свинец ($\sigma_s = 18...20$ МПа). Это позволило не предъявлять высоких требований к прочности экспериментальной оснастки и, таким образом, значительно снизить ее стоимость, провести необходимые для теоретического анализа предварительные эксперименты в кратчайшие сроки.

Работа выполнена под руководством проф. Евстратова В.А.

Истинное сопротивление деформации σ_s используется для учета упрочнения в теоретических решениях.

Для определения характера формоизменения и силового режима при выдавливании детали с характерным вихревым течением исследовали тестовые задачи – выдавливание круглой детали из квадратной заготовки и квадратной детали круглым пуансоном.

Экспериментальные исследования выполнили на универсальной испытательной машине УИМ-50 усилием 500 МН (рис. 1), на которой осуществляли деформацию свинцовых заготовок в универсальном плунжерном штампе или в отдельных матрицах с приспособленными к ним пуансонами и выталкивателями. Универсальный штамп, позволяющий провести эксперимент, разработан на кафедре ОМД НТУ „ХПИ”. В конструкции экспериментального штампа учтена необходимость быстрой замены пуансона без нарушения соосности пуансона относительно матрицы. Для обеспечения точного направления пуансона относительно матрицы в штампе предусмотрено плунжерное направление. Пуансон установлен в плунжер. Плунжер через хвостовик закреплен в ползуне прессы и направляется втулкой. Составная матрица собрана из бандажа и сменной вставки, позволяющей легко менять степень деформации.

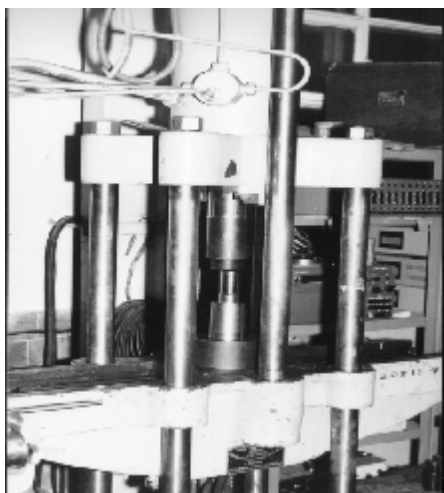


Рис. 1. Пресс для выдавливания (УИМ-50)

Чтобы исключить при установке сменного инструмента в пакет штампа несоосность относительно матрицы, последняя перемещается при помощи установочных винтов. Несоосность измеряли индикаторами часового типа. Фиксирование матрицы осуществляли винтами. Выдавленную деталь удаляли из матрицы с помощью выталкивателя. Общий вид плун-

жерного штампа показан на рис. 2.

Комплект инструментов, состоящий из отдельных матриц и пуансонов, позволил провести эксперимент для различных соотношений размеров пуансона в плане к размерам матрицы, а также выполнить осадку квадратной заготовки в круглой матрице. Общий вид комплекта отдельных инструментов показан на рис. 3.

Для измерений использовали средства измерений (СИ), разработанные на кафедре. Эти средства измерения описаны в работах [1, 2]. Хорошо зарекомендовали себя при проведении экспериментов импульсные ходографы

ИХ-1, ИХ-0,1 дающие на осциллограмме непосредственный отчет перемещения пуансона в миллиметрах [1].

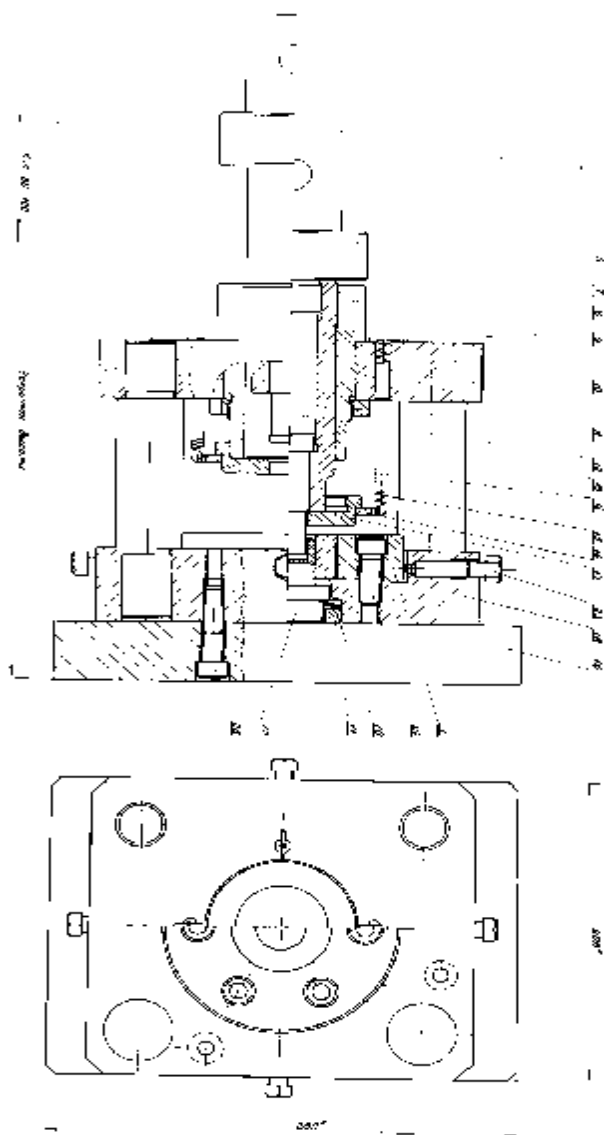


Рис. 2. Штамп плунжерный

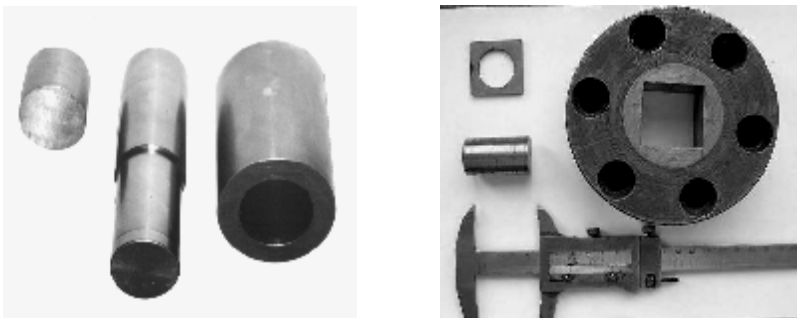


Рис.3. Универсальная оснастка для выдавливания
(комплект отдельных инструментов)

Методики экспериментального исследования, использованные в работе, также хорошо апробированы: это метод координатной сетки, метод тензометрирования, метод непосредственных измерений.

Задача предварительного этапа экспериментального исследования состояла в том, чтобы показать наличие двух существенно различных стадий при выдавливании деталей с переменной по периметру толщиной стенки. Для этого необходимо было доказать, что фестон образуется только на начальной стадии выдавливания, а на второй стадии течение металла по периметру стенки происходит с одинаковой по периметру компонентой скорости v_z .

Эксперимент организовали следующим образом. В штамп для выдавливания квадратной заготовки с круглой полостью в точках A и B (рис. 4) ввели Z -образные наконечники, которые присоединили к стержням ходографа ИХ-1. Это позволило измерить вертикальные перемещения стенки в разных местах.

По результатам измерений получили ходограммы, по которым построили графики. Типовой график представлен на рис. 5. Из рисунка видно, что в начале процесса выдавливания вертикальное перемещение тонкой стенки более интенсивно. На этом этапе формируется фестон. Затем, после точки M , положение которой характеризует вдавливание пуансона в заготовку Δh^* , течение металла в тонкую и толстую стенки становится одинаковым. Поэтому высота фестона не увеличивается.

Объяснить такое течение можно следующим образом. На начальной стадии процесс протекает как чисто радиальный. На рис. 6 показано, как происходит течение в стенку. Из условий постоянства расхода через сечения OAB и $ABLK$, а также OCD и $CDNM$, которое определяется условием радиальности течения ($v_\theta = 0$), находим соотношение скоростей в толстой и тонкой стенках и строим зависимость $v_z = F(\theta)$.

При достаточной высоте фестона Φ , соответствующего внедрению пуансона на (Δh^*) , сдвиги в соседних слоях стенки, обусловленные различием скоростей $v_{z2}(\theta)$ и $v_{z2}(\theta+d\theta)$, как это показано на рис. 7, оказываются такими, что становится энергетически более выгодной деформация по вихревой схеме.

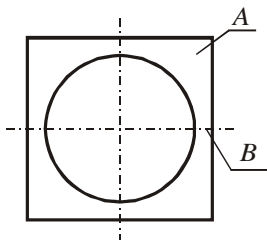


Рис. 4. Схема размещения точек измерения вертикальных перемещений стенки выдавливаемой детали

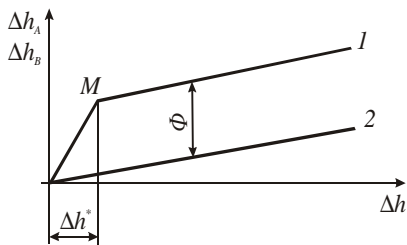


Рис. 5. Графики зависимости вертикальных перемещений стенки в точках А (2) и В (1)

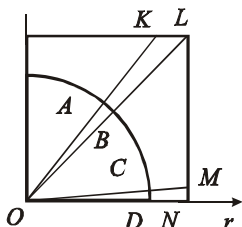


Рис. 6. Схема к расчету высоты фес-тона

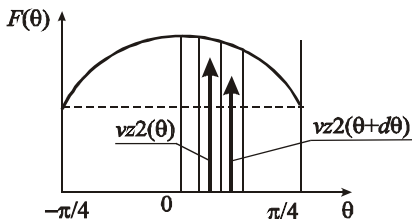


Рис. 7. Развертка стенки по периметру

Графики зависимости вертикальных перемещений стенки в точках А (1) и В (2), подобные тем, которые показаны на рис. 5, построены для различных соотношений диаметров пуансона (при постоянной ширине стороны квадрата $A = 35,35$ мм. На всех графиках достаточно четко выявляется размер Δh^* , который определяет переход от радиального течения к вихревому. Таким образом, экспериментально доказано, что вихревое течение металла – это реальность, и для такого течения металла необходимо иметь расчетные зависимости, на основании которых можно либо управлять характером течения, либо прогнозировать результаты такого течения.

Цель проверочных экспериментальных исследований состояла в том, чтобы показать, насколько теоретические исследования приемлемы для анализа процесса выдавливания деталей с переменной по периметру толщиной стенки.

Вначале исследовали характер деформации. Ставили цель – построить экспериментально функции скоростей перемещений при вихревом движении. Для этого использовали метод координатных сеток. Исходную заготовку в виде квадрата со стороной $A = 35,35$ мм и высотой $H = 9,5$ мм составляли из двух частей. Перед выдавливанием такой составной заготовки на поверхность разреза устанавливали бумажную прокладку, а затем такую трехслойную заготовку деформировали. После деформации получали картинки, подобные представленной на рис. 8.

К сожалению, при малых деформациях заготовки Δh на поверхности бу-

мажной прокладки практически не было видно особенностей течения, а при больших деформациях заготовки Δh на поверхности бумажной прокладки получалась картина, которая никак не соответствовала малым этапным деформациям. Единственное, что хорошо удалось в этом эксперименте, – это четко выявить, что есть области (они хорошо видны на рис. 8 в виде разрывов), в которых явно просматривается деформация по координате θ . Этот факт непосредственным образом подтверждает наличие вихревого движения при обжатии квадратной заготовки в круглой матрице.

Далее исследовали характер формоизменения заготовки с координатной сеткой. Использовали рекомендованные в литературе [3] ортогональные и радиальные координатные сетки (рис. 9).

Если заготовку устанавливали сеткой к пуансону, то в процессе течения металла по поверхности пуансона сетка сильно замазывалась, что не позволяло сделать ее математическую обработку. Кроме того, трение на контактной поверхности пуансона сильно искажало характер деформации.



Рис. 8. Схема направления течения металла

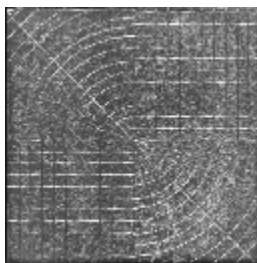


Рис. 9. Заготовка с координатной сеткой до деформации



Рис. 10. Заготовка с координатной сеткой после деформации

Поэтому попытались использовать составную заготовку (из двух частей), на одну из сторон которой наносили царапанием (как и в предыдущем случае) ортогональные и радиальные сетки. Заготовки складывали так, чтобы сетка оказывалась на середине высоты заготовки. Это позволяло:

- 1) уберечь сетку от замазывания;
- 2) расположить сетку в области, где контактное трение не искажает течение металла.

К сожалению, и эта попытка не увенчалась успехом: при малых деформациях заготовки Δh ошибки измерения положения координатных линий были соизмеримы с самими деформациями, и поэтому получалась недостоверная картина; при больших деформациях заготовки Δh картина деформации искажалась тем, что мы получали не этапную деформацию, а накопленную за несколько малых этапов. Кроме того, из-за неравномерности деформации после обжатия заготовки на Δh картина деформированной сетки получалась такой, что обработать ее математически также не представлялось возможным (рис. 10).

В связи с тем, что описанные подходы оказались неудачными, использовали модернизированный метод координатных сеток [АС Δ], который разработан на кафедре [3].

Суть метода состоит в том, что координатная сетка наносится не методом царапания в виде ортогональных линий с малым шагом (от 1 до 3 мм), а вдавливанием индентора треугольной формы. При этом получается сетка в виде кернений треугольной формы, как это показано на рис. 11.

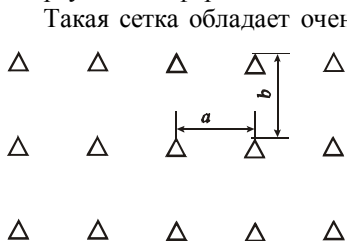


Рис. 11. Схема ортогональной координатной сетки, полученной кернением треугольных отпечатков

Такая сетка обладает очень важным свойством: независимо от искажения координатных линий (их расширения или сужения, изгиба, поворота) вершина кернения остается четко различимой и достаточно точно идентифицируется. Однако и эта попытка оказалась неудачной. В связи с неровностью поверхности, на которую была нанесена координатная сетка, на инструментальном микроскопе не удавалось точно измерить координаты вершин кернений.

Тогда попытались зафиксировать положение вершин кернений до деформации и после малых этапных деформаций

при помощи сканера, а затем обработать полученные массивы данных с помощью пакета *Grafula3* [4]. К сожалению, и этот путь оказался неудачным, так как сканер EPSON PERFECTION 2480 PHOTO давал погрешность, соизмеримую с перемещением узлов координатной сетки.

Описанные выше попытки показали бесперспективность идеи получить достаточно точное экспериментальное поле скоростей в условиях вихревого течения металла. Поэтому пришли к выводу о том, что экспериментально можно исследовать только четыре параметра:

- 1) степень заполнения при выдавливании квадратной заготовки в круглой матрице;
- 2) фестонистость при выдавливании квадратной заготовки в круглой матрице;
- 3) силовой режим выдавливания квадратной заготовки в круглой матрице;
- 4) силовой режим выдавливания квадратной заготовки круглым пуансоном.

На рис. 12 показано сопоставление опытных и расчетных значений степени незаполнения матрицы от угла заполнения. Как видно из этого рисунка, характер теоретической зависимости (изображено линией) соответствует характеру экспериментальной (отмечено точками). Это свидетельствует об адекватности математического описания.

Фестонистость при выдавливании квадратной заготовки в круглой матрице определяли непосредственным измерением и сравнивали с теоретически

рассчитанными (как это показано на рис. 13, кривыми даны теоретические значения, точками – экспериментальные данные).

Рис. 12. Графики изменения степени незаполнения матрицы s от угла заполнения θ_3 (на разных этапах деформации)

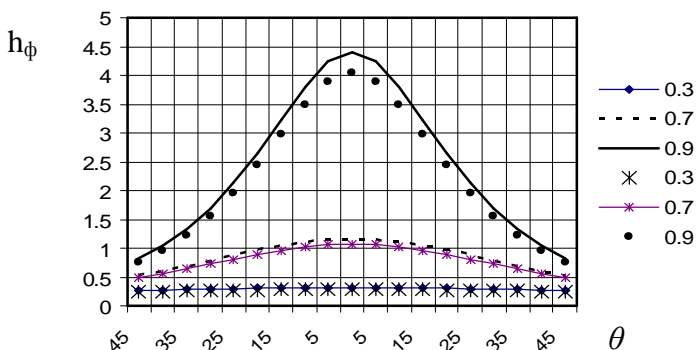
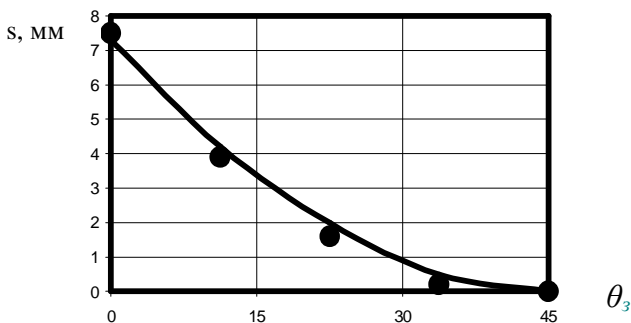


Рис. 13. Сопоставление численных значений фестонности

Как видно из этого рисунка, фестонность сильно зависит от степени деформации γ_n/A : чем больше этот показатель (то есть, чем тоньше стенка выдавливаемой детали), тем больше фестонность. Из рис. 13 также видно, что экспериментальные точки лежат достаточно близко к теоретическим кривым. Это весьма важно, так как позволяет прогнозировать фестонность на стадии проектирования техпроцесса перед изготовлением дорогостоящего штампа, а при больших степенях деформации потери металла на обрезку фестонов могут оказаться весьма и весьма высокими. Так, например, при $\gamma_n/A = 0,85 \dots 0,90$ срезать в отход нужно уже около половины высоты стакана.

Приведенные данные свидетельствуют, во-первых, об адекватности и достоверности теоретического описания процесса в условиях вихревого течения, а, во-вторых, о полезности полученного решения, так как оно позволяет получить информацию о процессе прежде, чем он будет осуществлен в производстве.

Силовой режим выдавливания квадратной заготовки в круглой матрице принципиально отличается от силового режима выдавливания квадратной за-

готовки круглым пуансоном. В первом случае усилие непрерывно увеличивается, и ось ординат служит асимптотой для кривой изменения усилия деформации. Во втором случае имеет место достаточно развитая стационарная стадия, в продолжение которой усилие остается постоянным. Это значительно упростило экспериментальное исследование. Нам нужно было только определять усилие стационарной стадии для разных степеней деформации (для разных толщин стенок выдавливаемых деталей).

Поэтому использовали метод непосредственных измерений усилия деформации при помощи силоизмерителя машины УИМ-50.

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 14. Здесь они показаны точками. Сплошными линиями показаны теоретические кривые. На оси ординат показано относительное усилие деформации.

Анализируя силовой режим выдавливания квадратной заготовки круглым пуансоном, мы получили интересный факт. График зависимости $p = F(\Delta h)$ несколько отличается от общеизвестного, характерного для безвихревого течения (осесимметричного выдавливания стаканов с постоянной толщиной стенки). Это отличие состоит в том, что в начале деформации процесс идет по схеме радиального течения, которая требует меньшего усилия, а затем, по мере увеличения высоты стенки стакана, когда сдвиги в соседних слоях стенки становятся значительными, процесс переходит в вихревую, который требует большего усилия. Схематически это показано на рис. 15, который позволяет понять особенности силового режима деформации выдавливания квадратной заготовки круглым пуансоном. Здесь видно, что стационарная стадия процесса начинается только после того, как энергетически становится более выгодным вихревое течение. Поэтому на участке $0 - \Delta \bar{h}^*$ происходит энергетически более выгодное

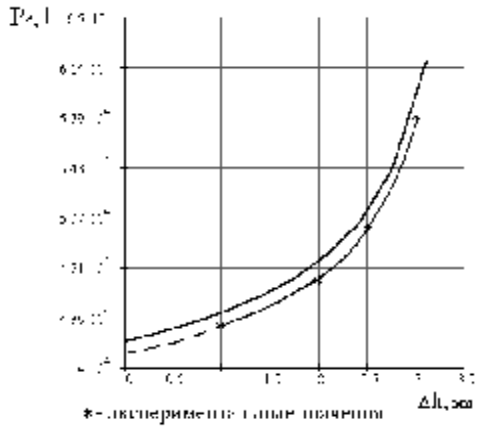


Рис. 14. Силовой режим деформации квадратной заготовки в круглой матрице ($r_n = r_m = 50$ мм, сторона заготовки $A = 35,35$ мм)

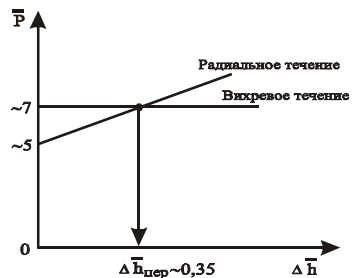


Рис. 15. Схема перехода от радиального к вихревому течению в процессе выдавливания детали с переменной по периметру толщиной стенки

радиальное течение, а на участке $\Delta h^* - I$ энергетически более выгодное вихревое течение.

ВЫВОДЫ. Таким образом, по проведенным экспериментам можно сделать следующие выводы.

1. Для проведения экспериментального исследования спроектирован и изготовлен оригинальный штамп (плунжерного типа), позволяющий быстро заменять пуансон, при этом не нарушать соосность пуансона относительно матрицы, а также собрана тензометрическая установка для регистрации усилия выдавливания.

2. Предложенные в работе методики экспериментального исследования позволяют определить особенности формоизменения и силового режима выдавливания деталей со сложным течением металла, проверить адекватность математической модели, разработать технологический процесс и определить основные конструктивные параметры штампа.

3. Теоретические расчеты и результаты, полученные экспериментально, свидетельствуют о том, что при выдавливании сложных деталей с переменной по периметру толщиной стенки процесс протекает в две стадии. На первой формируются фестоны высотой $h_{\text{ф}}$, которую можно определить по приведенной методике. Вторая стадия характеризуется условием $v_z = \text{const}$, которое показывает, что при дальнейшей деформации фестоны не подрастают. Такие условия формоизменения свидетельствуют о том, что на первой стадии имеет место радиальное течение металла, а на второй – вихревое.

4. Процесс выдавливания квадратной заготовки в круглой матрице протекает по схеме трехмерного (вихревого) течения металла, экспериментальное исследование которого возможно при помощи нанесенной кернением ортогональной сетки. В ходе эксперимента возможно определение степени заполнения при выдавливании, а также силовой режим выдавливания квадратной заготовки в круглой матрице.

5. Результаты, полученные в ходе экспериментального исследования, подтвердили теоретические. Расхождение численных значений, полученных в ходе экспериментов, не превышает 6-8%.

Список литературы: 1. *Євстратов В. О., Даниленко В. Я., Кирилов Г. І., Кузьменко В. І.* Методи дослідження процесів обробки металів тиском: визначення силового режиму // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С.11-17. 2. *Кузьменко В.И., Левченко В.Н., Кузьменко Е.А.* Определение нормальных давлений при холодной объемной штамповке // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С.121-123. 3. *Євстратов В.О., Кутецький Я.В., Левченко В.М., Кротенко Г.А.* Нові підходи до аналізу деформованого стану в процесах тривимірної деформації // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С.490-492. 4. <http://yjvt/comset/net/wesik/grafula3/grafula3/htm>.

Поступила в редколлегию 10.10.2006