

УДК 621.7.044

А.П. МЕЛЬНИЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ**

*На этапе оценки возможности использования тех или иных технологий в производстве рационально применение упрощенных инженерных (оценочных) методик определения характеристик процесса. Систематизированная оценочная методика определения параметров процессов гидродинамической штамповки осесимметричных деталей трубопроводов необходима для оценки возможности использования этих операций в изготовлении изделий трубопроводных систем, а также для расчета в первом приближении энергетических и силовых затрат и характеристик напряженно-деформированного состояния детали. Определение энергосиловых параметров гидродинамической штамповки сводится к расчету основных составляющих процесса: объема жидкости в камере; величины потребного давления жидкости; напряженно-деформированного состояния заготовки; работы сжатия жидкости и деформирования заготовки; потребной кинетической энергии снаряда и его дульной скорости.*

**Ключевые слова:** гидродинамическая штамповка, технологический процесс, осесимметричная деталь, объем, давление, работа, энергия, скорость.

**Введение**

Гидродинамическая штамповка (ГДШ) является одним из методов импульсной обработки металлов давлением. Способ гидродинамической штамповки, предложенный Ю.Г. Мацукиным, был разработан в Харьковском авиационном институте в 60-х годах прошлого столетия. Для реализации процесса ГДШ было разработано гидроударное штамповочное оборудование под названием «пресс-пушки». Начало практического освоения процессов ГДШ в машиностроении началось около сорока лет назад.

Актуальным вопрос о внедрении гидродинамической штамповки в производственные процессы самолетостроения стал при разработке высокоресурсных трубопроводов систем противообледенения и кондиционирования воздуха пассажирских и транспортных самолетов.

Совершенствование трубопроводов этих воздушных систем летательных аппаратов (ЛА) основывалось на реализации новых конструктивных решений, имеющих целью повышение надежности, ресурса и живучести, улучшение производственной, эксплуатационной и ремонтной технологичности при уменьшении массы систем и снижении затрат. В связи с этим был осуществлен переход на новые конструкционные материалы и облегченные элементы законцовок трубопроводов, и прогрессивные технологии их изготовления.

Принципиальная сущность ГДШ заключается в преобразовании кинетической энергии быстро ле-

тящего твердого тела (снаряда) в потенциальную энергию сжатой жидкости, под воздействием которой деформируется заготовка (рис. 1) [1, 2].

Основные параметры процесса гидродинамической штамповки:

- скорость снаряда в момент удара о поверхность жидкости 50...250 м/с;
- продолжительность импульса давления жидкости  $10^{-4}$ ... $10^{-2}$  с;
- достижимое давление в формующей камере 300...500 МПа.

Кратковременность процесса ГДШ соответствует такому режиму скоростного деформирования, при котором пластические характеристики штампуемых материалов несколько повышаются по сравнению со статическими показателями. В ряде случаев положительную роль играют инерционные силы материала заготовки и режим гидродинамического трения. В результате обуславливается возможность холодной обработки изделий из труднодеформируемых и высокопрочных сплавов, а отштампованные детали имеют высокую точность и чистоту поверхности.

Основной особенностью процесса гидродинамической штамповки является то, что формующая камера не имеет специальных уплотнений – “запирание” зазоров (технологических и конструктивно обусловленных) при импульсном нагружении жидкости происходит самопроизвольно вследствие резкого роста гидравлического сопротивления при высоких скоростях ее истечения.

### Постановка задачи исследования

Процесс ГДШ представляет собой сложную динамическую систему, для описания которой необходимо комплексно рассмотреть целый ряд разнообразных физических явлений [1, 3]. Математическое описание подобной взаимосвязанной системы процессов представляет собой чрезвычайно сложную задачу, разрешить которую совместно аналитическими методами не представляется возможным.

Совместное решение уравнений движения снаряда, передающей среды и заготовки возможно численными методами, в частности методом конечных элементов с использованием современных систем САЕ (computer-aided engineering).

При математическом моделировании операций ГДШ рациональным является разделение самого процесса на модули, охватывающие те или иные физические явления [3]. Таким способом, например, рассмотрен вопрос определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) сферического наконечника при ГДШ в динамической постановке. Для решения этой задачи использованы системы дифференциальных уравнений движения тонкостенных оболочек с учетом реализации больших пластических деформаций, с применением гипотезы Кирхгофа-Лява, с использованием физического закона, учитывающего упругую деформацию и линейное упрочнение в области пластических деформаций [4].

Очевидно, что математическое моделирование технологических операций с использованием современных систем САЕ адекватных реальным процессам является весьма трудоемким, требующим соответствующей квалификации и умений.

Однако кроме сложных математических моделей есть потребность в упрощенных инженерных (оценочных) методиках определения параметров процесса ГДШ.

Систематизированная оценочная методика определения энергосиловых параметров различных процессов ГДШ необходима для оценки возможности использования гидродинамической штамповки в изготовлении того или иного изделия, а также для определения в первом приближении энергосиловых параметров процесса и характеристик НДС детали.

Так как оценочная методика определения параметров ГДШ строится на упрощенных аналитических зависимостях, то очевидно, что при практической реализации процесса штамповки необходимо либо экспериментальное уточнение энергосиловых параметров процесса, либо построение уточняющей математической модели с использованием систем САЕ.

### Схема процесса ГДШ

Технологический процесс ГДШ на гидроударных установках типа «пресс-пушки» заключается в следующем (рис. 1). В матрицу 6 устанавливают заготовку 4. Наполняют жидкостью (водой) 3 внутреннюю полость заготовки и переходника ствола 2. Выполняют рабочий цикл (выстрел), в результате чего снаряд 1 приводится в поступательное движение в стволе пресс-пушки. Снаряд 1 ударяет по поверхности жидкости 3 и вытесняет ее из камеры (переходника ствола) 2 в полость матрицы 6. Возникшее при ударе в формующей камере пресс-пушки давление жидкости 3 и приводит к формоизменению заготовки 4 [1].

Движущийся снаряд 1 в момент удара о поверхность жидкости 3 обладает запасом кинетической энергии, которая преобразуется в потенциальную энергию сжатой жидкости 3 и затрачивается на ее сжатие и деформирование заготовки 4, в результате чего получается деталь 5.

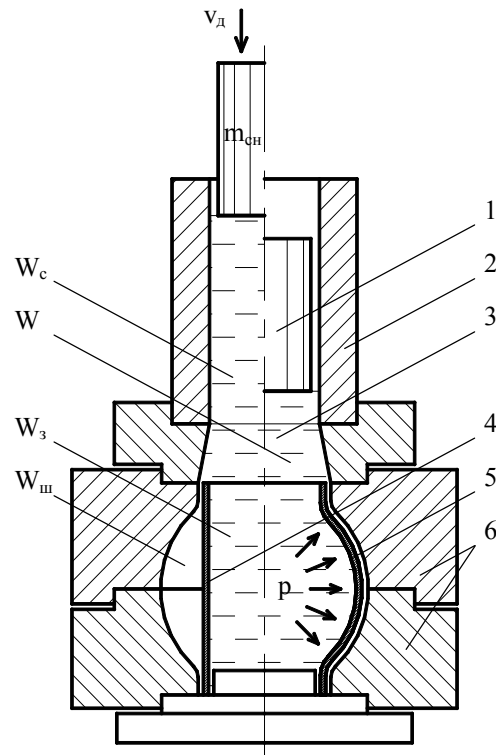


Рис. 1. Схема технологического процесса гидродинамической штамповки:

- 1 – снаряд; 2 – переходник ствола;
- 3 – передающая среда (вода); 4 – заготовка;
- 5 – деталь; 6 – оснастка (матрица);

$v_d$  – дульная скорость снаряда;  $m_{сн}$  – масса снаряда;  $p$  – давление в формующей камере;  $W_c$  – начальный объем жидкости в переходнике ствола;  $W_3$  – объем жидкости внутри заготовки;  $W_{ш}$  – объем заштамповой полости (между матрицей и заготовкой);  $W$  – конечный объем жидкости в камере

### Характеристика штампуемых изделий

Применение в высокотехнологических отраслях машиностроения процессов ГДШ на протяжении последних нескольких десятилетий позволило решить ряд производственных проблем в условиях опытного и серийного производств. Так, например, для самолетов Ан-74, Ан-124, Ан-225, Ан-70, Ан-140, Ан-148 изготавливаются с помощью рассматриваемых технологий более ста наименований деталей из титановых сплавов ПТ7М и ВТ1-0, стали 12Х18Н10Т.

Наиболее освоенные, широко внедренные в производство и подкрепленные основательной теоретической базой, являются технологические опера-

ции гидродинамической штамповки приварной арматуры особотонкостенного высокоресурсного трубопровода систем кондиционирования воздуха (СКВ) и противообледенительной (ПОС) пассажирских и транспортных самолетов.

Трубопроводы ПОС и СКВ относятся к воздушным системам ЛА, они рассчитаны на транспортировку больших объемов воздуха и находятся под действием динамических, циклических и повторно-статических нагрузок.

Высокоресурсный трубопровод воздушных систем ЛА изготавливают методом сборки-сварки из набора унифицированных элементов и приварной арматуры: наконечников, вставок, переходников и т.д. (рис. 2, табл. 1) [5].

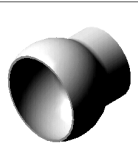


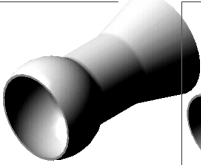
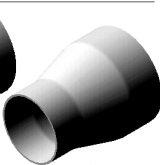





Рис. 2. Типовые осесимметричные детали трубопроводов воздушных систем ЛА

Элементы приварной арматуры предназначены для соединения отдельных участков трубопроводов. Конструктивно это особотонкостенные осесимметричные детали (относительная толщина  $\delta / D \leq 0,02$ ), изготовленные, преимущественно, из титановых сплавов (ПТ-7М, ВТ1-0 и ОТ4-1) и коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, а также, в ряде случаев, из алюминиевых сплавов АМг2М и АМг3М [6].

Соединительные элементы трубопроводов выполняют сложные и ответственные функции обеспечения герметичности и надежности при функционировании систем в условиях эксплуатации, к их сопрягаемым поверхностям предъявляют высокие требования по чистоте поверхности и точности геометрии.

Таблица 1  
Типовые осесимметричные элементы приварной арматуры высокоресурсных трубопроводов воздушных систем ЛА

Вид осесимметричных деталей трубопроводов							
							
Наименование элемента	Наконечник сферический	Наконечник конусный	Наконечник фланцевый	Вставка сфера-конус	Переходник	Бандаж	Законцовка длинномерной трубы
Материал	ПТ-7М ВТ1-0 12Х18Н10Т	ПТ-7М ВТ1-0 12Х18Н10Т	ПТ-7М ВТ1-0	ПТ-7М	ПТ-7М ВТ1-0 АМг2М	ПТ-7М ВТ1-0	ПТ-7М
Заготовка	цельнотянутая труба; сварная труба; стаканчик, полученный вытяжкой из листа						
Геометрия	диаметр трубопровода 25 – 140 мм; толщина стенки 0,8 – 1,2 мм						

## Определение энергосиловых параметров процесса ГДШ

Определение энергосиловых параметров гидродинамической штамповки сводится к расчету основных составляющих процесса:

1. Определение объема жидкости в гидравлической камере.
2. Определение величины потребного давления жидкости в формующей камере.
3. Определение НДС заготовки.
4. Определение работы сжатия жидкости и работы деформирования заготовки.
5. Определение потребной кинетической энергии снаряда и его дульной скорости.

### 1. Преобразование объема жидкости в процессе штамповки

Объем жидкости (воды) в гидравлической камере пресс-пушки в процессе штамповки не остается постоянным. Начальный объем жидкости  $W_0$  определяется как сумма объем жидкости в переходнике ствола  $W_c$  и объема, заключенного внутри заготовки  $W_3$ , т.е.

$$W_0 = W_c + W_3, \quad (1)$$

где  $W_0$  – начальный объем жидкости в гидравлической камере;

$W_c$  – объем жидкости в переходнике ствола;

$W_3$  – объем жидкости в внутри заготовки.

В процессе нагружения жидкости при ударе снаряда происходит упругое ее сжатие на величину  $\Delta W_{ж}$ . Кроме этого объем жидкости в камере уменьшается на величину ее потерь через зазоры  $\Delta W_{п}$ .

Так как после снятия нагрузки происходит восстановление объема жидкости после ее сжатия, то в конце процесса объем жидкости в камере равен

$$W = W_0 - \Delta W_{п}, \quad (2)$$

где  $W$  – конечный объем жидкости в гидравлической камере;

$\Delta W_{п}$  – объем потерь через конструктивно обусловленные и случайные зазоры.

В зависимости от конструктивных особенностей установок объем потерь через зазоры  $\Delta W_{п}$  может составлять 5 – 15% от начального объема жидкости в гидравлической камере  $W_0$ .

Изменение объема жидкости при ее упругом сжатии  $\Delta W_{ж}$  зависит от величины нагружающего давления. В установках для ГДШ  $\Delta W_{ж}$  (для воды) максимально может достигать 10 – 12% от начального объема жидкости  $W_0$  (рис. 3).

Жидкость, вытесняемая снарядом из переходника ствола в полость заготовки  $W_3$ , приводит к увеличению ее (заготовки) внутреннего объема.

Максимальное приращение внутреннего объема заготовки  $\Delta W_3$  ограничено величиной объема заштамповой ее полости  $W_{ш}$ , образованного между рабочей поверхностью матрицы и заготовкой, т.е.

$$W_{3_{max}} = W_3 + \Delta W_{3_{max}} = W_3 + W_{ш}, \quad (3)$$

где  $W_{3_{max}}$  – максимальный объем жидкости во внутренней полости заготовки;

$\Delta W_{3_{max}}$  – максимальное приращение внутреннего объема заготовки;

$W_{ш}$  – объем заштамповой полости заготовки, т.е. объем между матрицей и заготовкой.

Таким образом, в процессе нагружения жидкости и деформирования заготовки происходит вытеснение (перемещение) жидкости из переходника ствола в заштамповую полость заготовки.

Расчетная величина вытесняемого объема жидкости  $W_b$  определяется как сумма объема заштамповой полости заготовки  $W_{ш}$  и приращений объема жидкости, связанных с ее потерями  $\Delta W_{п}$  и упругим сжатием  $\Delta W_{ж}$ . Учет значений  $\Delta W_{п}$  и  $\Delta W_{ж}$  необходим для избегания возможного контакта снаряда с заготовкой при его перемещении, т.к. потери жидкости и ее сжатие приводит к смещению вниз границы жидкости в переходнике ствола. Таким образом,

$$W_b = W_{ш} + \Delta W_{п} + \Delta W_{ж} = W_{ш} + \Sigma \Delta W, \quad (4)$$

где  $W_b$  – вытесняемый объем жидкости в гидравлической камере;

$\Delta W_{ж}$  – объем упругого сжатия жидкости;

$\Sigma \Delta W$  – сумма значений объемов  $\Delta W_{п}$  и  $\Delta W_{ж}$ .

Оптимальным с точки зрения соотношения полезных и балластных энергетических затрат при нагружении заготовки через жидкую передающую среду является вариант, где  $W_b = W_{ш} + \Sigma \Delta W$ .

В случае реализации процесса штамповки, где  $W_b < W_{ш} + \Sigma \Delta W$  потребуется более одного штамповочного перехода, а при варианте  $W_b > W_{ш} + \Sigma \Delta W$  – необходима дополнительная затрата энергии для сжатия балластного (избыточного) объема жидкости [7].

### 2. Сжатие жидкости в гидравлической камере

Давление в жидкости зависит от степени ее сжатия. Степень сжатия жидкости определяется ее характеристиками и количеством энергии, затраченной на изменение объема жидкости. При ГДШ нагружение жидкости в гидравлической камере производится летящим снарядом, который тормозится при контакте с ней, в результате чего кинетическая энергия снаряда преобразуется в потенциальную энергию сжатой жидкости.

Для жидкости нет универсального состояния. Зависимость между давлением и объемом жидкости

устанавливается экспериментально, а затем представляется в виде функции величины относительного сжатия жидкости от давления. Для многих жидкостей при давлении до 1200 МПа их сжимаемость удовлетворительно выражается уравнением Тэта

$$p = B \left[ \left( \frac{W_0}{W} \right)^n - 1 \right], \quad (5)$$

где  $p$  – давление жидкости в гидравлической камере;  $W_0$  и  $W$  – начальный и текущий (конечный) объемы жидкости;

В и  $n$  – эмпирические величины, по данным Бриджмена и Гибсона, для пресной воды – соответственно 29400 МПа и 7,47.

Графиком этой нелинейной зависимости служит кривая  $p = f(W)$  на рис. 3. При решении определенного класса задач, когда относительное сжатие жидкости не превышает 10%, допустима линеаризация уравнения состояния жидкости

$$p = E_{\text{ж}} \frac{W_0 - W}{W} = E_{\text{ж}} \frac{\Delta W}{W}, \quad (6)$$

где  $E_{\text{ж}}$  – модуль объемного сжатия жидкости;  $\Delta W / W$  – относительное сжатие жидкости.

В зависимости от интервала рабочих давлений выбирается величина  $E_{\text{ж}}$ , соответствующая одной из прямых на рис. 3 (линии 1 – 3). В большинстве реализуемых процессов ГДШ давление не превышает 100 МПа, поэтому допустимо использование модуля объемного сжатия воды равного 2200 МПа.

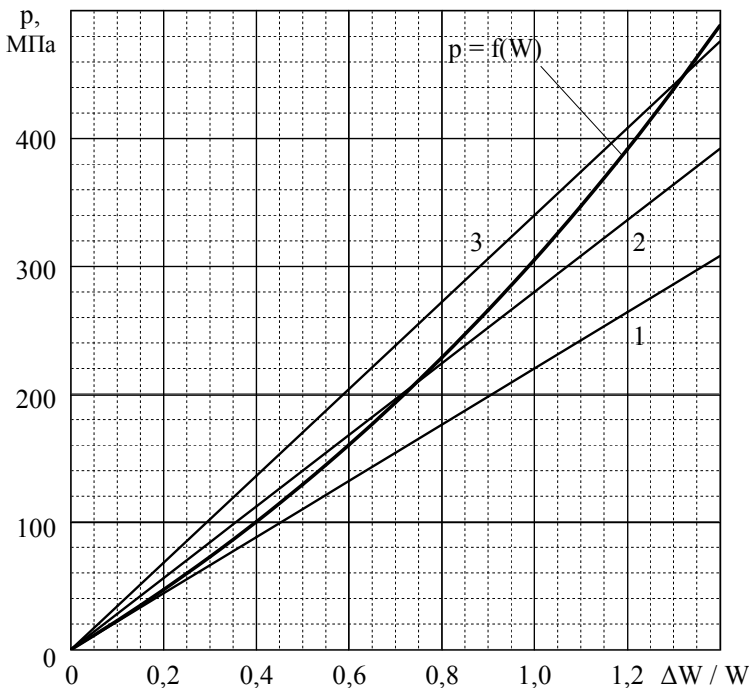


Рис. 3. Зависимость изменения объема жидкости в гидравлической камере от давления:

$p = f(W)$  – функция сжимаемости жидкости по уравнению Тэта (5); 1, 2, 3 – линейная функция сжатия жидкости при различных значениях  $E_{\text{ж}}$ : 1 – 2200 МПа; 2 – 2800 МПа; 3 – 3400 МПа

### 3. Напряженно-деформированное состояние заготовки

Наиболее точное определение НДС заготовки при ГДШ возможно совместным решением уравнений движения тонких оболочек и пластического течения в динамической постановке [8]. Однако, совместное решение этих уравнений возможно только численными методами.

В инженерных оценочных расчетах определение параметров НДС заготовки строится с использованием положений теории упруго-пластического деформирования тонкостенных оболочек с учетом некоторых допущений:

- так как заготовка тонкостенная, то возможно использование теории тонких оболочек в безмоментной постановке;
- в тонкостенной оболочке реализуется плоское напряженное состояние, где при осесимметричной деформации главными будут оси, направленные вдоль образующей и в окружном направлении;
- материал заготовки однороден, несжимаем и обладает равномерными механическими свойствами;
- распределение давления передающей среды осесимметрично и однородно в осевом направлении.

Граничные условия на торцах оболочки назначаются в соответствии с наиболее часто реализуемой на практике технологической схемой процесса – штамповкой со свободными торцами.

В качестве дополнительного условия принимается допущение отсутствия сил трения между матрицей и заготовкой.

Связь внешних и внутренних сил в статической постановке при деформировании заготовки определяется совместным решением уравнения Лапласа (уравнения равновесия), условия постоянства объема и условия пластичности (рис. 4) [6]:

$$\frac{\sigma_s}{r_s} + \frac{\sigma_\theta}{r_\theta} = \frac{p}{h}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_s + \varepsilon_\theta + \varepsilon_h = 0; \quad (8)$$

$$\sigma_s^2 - \sigma_s \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_i^2, \quad (9)$$

где  $\sigma_s, \sigma_\theta$  – главные напряжения в меридиональном (вдоль образующей) и широтном (окружном) направлениях;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений;

$r_s, r_\theta$  – радиусы кривизны оболочки в меридиональном и широтном направлениях;

$p$  – нормальное давление передающей среды;

$h$  – толщина оболочки;

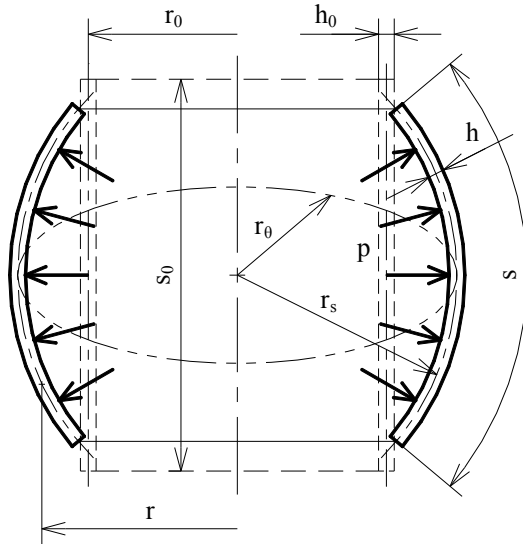


Рис. 4. Тонкостенная осесимметричная оболочка, ее геометрические и силовые параметры:

$p$  – нормальное давление передающей среды (воды);  $r_s, r_0$  – радиусы кривизны оболочки в меридиональном и широтном направлениях;  $r_0, r$  – начальное и текущее значения радиуса заготовки;  $s_0, s$  – начальное и текущее значения длины образующей оболочки;  $h_0, h$  – начальное и текущее значения толщины заготовки

$\epsilon_s, \epsilon_\theta, \epsilon_h$  – логарифмические (истинные) деформации вдоль образующей, окружные и по толщине соответственно, определяемые соотношениями:

$$\epsilon_s = \ln \frac{s}{s_0}; \quad (10)$$

$$\epsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0}; \quad (11)$$

$$\epsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}, \quad (12)$$

где  $s_0, s$  – начальное и текущее значения длины образующей оболочки;

$r_0, r$  – начальное и текущее значения радиуса заготовки  $r_0$ ;

$h_0, h$  – начальное и текущее значения толщины заготовки.

Заготовка переходит в состояние пластического деформирования при достижении интенсивности напряжений  $\sigma_i$  величине равной или превышающей предел текучести  $\sigma_T$ .

Величина интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  вычисляется из составляющих деформированного состояния заготовки по формуле

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_s - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_h)^2 + (\epsilon_h - \epsilon_s)^2}. \quad (13)$$

Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций определяет физический закон упрочнения материала  $\sigma_i(\epsilon_i)$ , представление

аппроксимационной функции которого для разных материалов различно.

Рационально экспериментально полученный закон упрочнения аппроксимировать степенным рядом Маклорена, удерживая в нем количество членов, обеспечивающее заданную степень точности аппроксимации

$$\sigma_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \epsilon_i^j. \quad (14)$$

где  $a_0, a_j$  – коэффициенты аппроксимации.

Представленное статическое уравнение равновесия (7) позволяет оценить в первом приближении параметры НДС заготовки. Для более точного и корректного расчета НДС необходимо использовать уравнения движения оболочки с учетом инерционных сил [8], т.к. данные процессы динамичны и скоротечны.

#### 4. Затрачиваемая энергия и выполняемая в камере работа

Кинетическая энергия летящего снаряда на дульном срезе ствола должна быть равна сумме всех работ (энергетических затрат), производимых в гидравлической камере

$$E_{сн} = A_\Sigma, \quad (15)$$

где  $E_{сн}$  – кинетическая энергия летящего снаряда;

$A_\Sigma$  – суммарная работа в гидравлической камере.

Суммарная работа в гидравлической камере  $A_\Sigma$  расходуется на сжатие жидкости, выполнение работы деформирования заготовки и разного рода энергетические потери.

Без учета коэффициента полезного действия (КПД) технологического узла установок для ГДШ, зависящего от энергопотерь, расходуемая работа в гидравлической камере равна [6]

$$A = A_d + A_{ж}, \quad (16)$$

где  $A_d, A_{ж}$  – работа пластического деформирования заготовки и сжатия жидкости соответственно.

В общем виде затрачиваемая на процесс деформирования работа  $A_d$  без учета скоростного упрочнения вычисляется по формуле

$$A_d = \int_V \int_0^{\epsilon_i} \sigma_i(\epsilon_i) d\epsilon_i dV, \quad (17)$$

где  $V$  – объем деформируемого участка заготовки;

$\epsilon_i$  – интенсивность деформаций;

$\sigma_i(\epsilon_i)$  – закон упрочнения материала.

На достижение необходимого давления жидкости затрачивается работа адиабатического ее сжатия  $A_{ж}$ , определяемая соотношением

$$A_{ж} = \int_{W_0}^W p dW, \quad (18)$$

где  $W_0$  и  $W$  – начальный и конечный объемы жидкости;

$p$  – давление жидкости в гидравлической камере.

При использовании линеаризованного уравнения состояния жидкости (6) выражение, определяющее работу сжатия жидкости  $A_{ж}$  можно представить в виде

$$A_{ж} = \frac{p^2 W_0}{2E_{ж}}, \quad (19)$$

где  $E_{ж}$  – модуль объемного сжатия жидкости, равный для воды 2200 МПа (при большинстве процессов ГДШ).

Такое представление функции работы сжатия жидкости  $A_{ж}$  является достаточным для инженерных расчетов при относительном сжатии жидкости не превышающем 10%.

Пусть  $p_1$  и  $p_2$  – давление жидкости в гидравлической камере в начале и конце процесса деформирования заготовки соответственно.

Тогда снаряд при нагружении жидкостью до давления  $p_1$  высвобождает ее объем в камере на величину  $\Delta W_1$ , при этом совершается работа исключительно по сжатию жидкости, т.е.

$$\Delta W_1 = \Delta W_{ж1}, \quad (20)$$

где  $\Delta W_1$  – высвобождаемый объем жидкости при

давлении  $0 < p \leq p_1$ ;

$\Delta W_{ж1}$  – величина сжатия объема жидкости при этом диапазоне давления.

Тогда, опираясь на линеаризованное представление состояния жидкости, затрачиваемая в гидравлической камере работа  $A_1$  при давлении до  $p_1$  равна

$$A_1 = \frac{p_1^2 W_0}{2E_{ж}} = \frac{p_1}{2} \Delta W_1 = A_{ж1}, \quad (21)$$

где  $A_1$  – работа, реализовываемая в гидравлической камере в диапазоне давлений  $0 < p \leq p_1$ ;

$A_{ж1}$  – работа сжатия жидкости до давления  $p_1$ ;

$p_1$  – давление жидкости в камере до начала процесса деформирования заготовки;

$W_0$  – начальный объем жидкости в камере.

Реализуемая в гидравлической камере работа  $A_1$  соответствует площади треугольника ABC на диаграмме поля работ (рис. 5). Эта работа затрачивается на сжатие жидкости до давления  $p_1$  и она равна  $A_{ж1}$ .

При превышении давления  $p_1$  начинает деформироваться заготовка.

На этапе формообразования заготовки снаряд на своем пути высвобождает объем  $\Delta W_2$ , при этом жидкость, деформируя заготовку, вытесняется в заштамповую ее полость  $W_{ш}$ , а так же происходит дальнейшее сжатие жидкости на величину  $\Delta W_{ж2}$ .

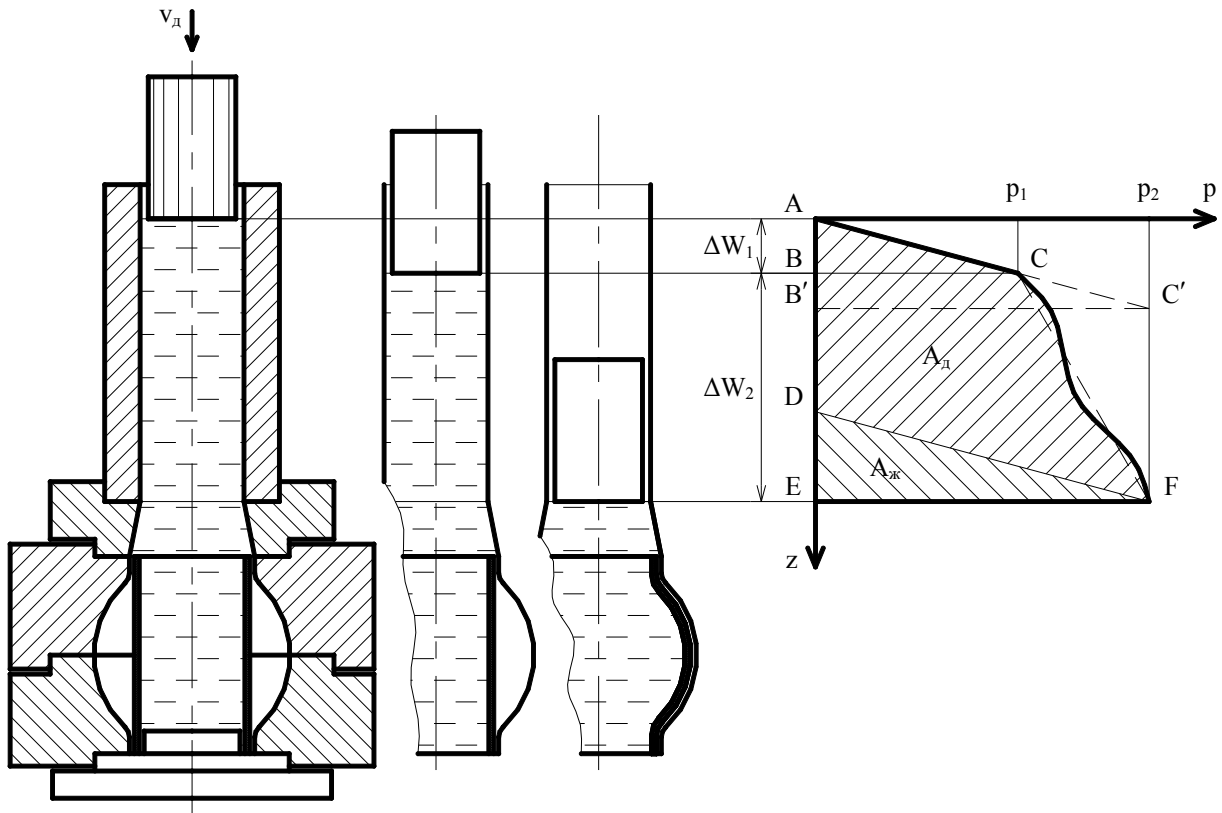


Рис. 5. Схема процесса и поле реализуемой в гидравлической камере работы:

$p_1, p_2$  – давление жидкости в гидравлической камере в начале и конце процесса деформирования заготовки;  $\Delta W_1, \Delta W_2$  – объем жидкости, вытесняемый снарядом при давлении  $p_1$  и  $p_2$  соответственно;  $A_д, A_{ж}$  – работа пластического деформирования заготовки и сжатия жидкости соответственно;  $v_d$  – дульная скорость снаряда

Давление жидкости в гидравлической камере в этом случае изменяется в диапазоне  $p_1 < p \leq p_2$ , тогда

$$\Delta W_2 = W_{ш} + \Delta W_{ж_2}, \quad (22)$$

где  $\Delta W_2$  – вытесняемый снарядом объем жидкости при давлении  $p_1 < p \leq p_2$ ;

$\Delta W_{ж_2}$  – величина сжатия объема жидкости при этом диапазоне давления;

$W_{ш}$  – объем заштамповой полости заготовки (между матрицей и заготовкой).

Таким образом, в камере затрачивается работа  $A_2$ , которая расходуется на деформирование заготовки и сжатие жидкости до давления  $p_2$

$$A_2 = A_{д} + A_{ж_2}, \quad (23)$$

где  $A_2$  – работа, реализовываемая в гидравлической камере в диапазоне давлений  $p_1 < p \leq p_2$ ;

$A_{д}$  – работа пластического деформирования заготовки;

$A_{ж_2}$  – работа сжатия жидкости в диапазоне давлений  $p_1 < p \leq p_2$ .

Функцию (17) определения работы пластического деформирования заготовки  $A_{д}$  упрощенно можно представить в виде

$$A_{д} = \frac{p_1 + p_2}{2} W_{ш}, \quad (24)$$

где  $p_1, p_2$  – давление жидкости в гидравлической камере в начале и конце процесса деформирования заготовки соответственно.

Тогда работа  $A_2$  в гидравлической камере при давлении  $p_1 < p \leq p_2$  равна

$$A_2 = \frac{p_1 + p_2}{2} W_{ш} + A_{ж_2}. \quad (25)$$

Суммируя выполняемую в камере работу при давлениях  $0 < p \leq p_1$  и  $p_1 < p \leq p_2$  получаем обобщенную ее величину  $A$ , равную

$$A = A_{ж_1} + A_{ж_2} + A_{д}. \quad (26)$$

С учетом выражения (19) суммарные затраты энергии на сжатие жидкости можно представить как

$$A_{ж_1} + A_{ж_2} = \frac{p_2^2 W_0}{2E_{ж}}. \quad (27)$$

Тогда выражение (26) преобразуется следующим образом

$$A = \frac{p_2^2 W_0}{2E_{ж}} + \frac{p_1 + p_2}{2} W_{ш}. \quad (28)$$

Реализуемая в гидравлической камере работа  $A_2$  соответствует площади фигуры BEFC на диаграмме поля работ (рис. 5). Эта работа затрачивается на деформирование заготовки ( $A_{д}$ ) и дальнейшее сжатие жидкости в диапазоне давлений  $p_1 < p \leq p_2$  ( $A_{ж_2}$ ).

На рис. 5 видно, что энергия, запасенная жидкостью к концу процесса при ее сжатии, соответствует площади треугольника AB'C' или DEF, а работа

пластического деформирования заготовки соответствует площади фигуры ADFC. Таким образом, суммарная расходуемая в гидравлической камере работа согласно выражению (16) равна площади фигуры AEFC.

В практических инженерных расчетах также возможно использование прикладных диаграмм Г.К. Бронина, которые получены экспериментально (рис. 6) [6]. По этим диаграммам можно определить величину потребной энергии удара в зависимости от требуемого давления и объема жидкости в камере. Здесь следует учесть, что энергия удара  $E$  затрачивается на выполнение работы в камере  $A$ , т.е.  $E = A$ .

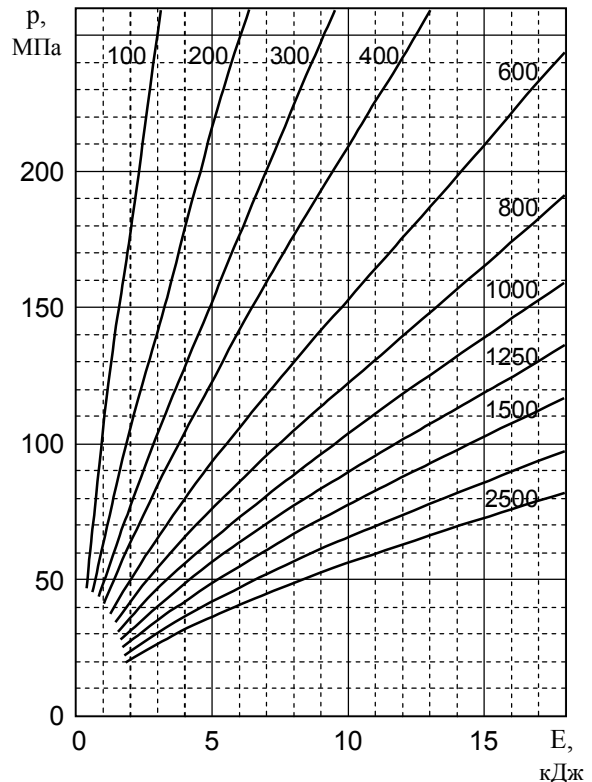


Рис. 6. Зависимость изменения давления  $p$  от энергии удара  $E$  при различных объемах жидкости ( $W, \text{см}^3$ )

С учетом КПД технологического узла реальная суммарная работа в гидравлической камере  $A_{\Sigma}$  несколько меньше расчетной ее величины  $A$  (27) и определяется выражением

$$A_{\Sigma} = \frac{A}{\eta_{ту}}, \quad (29)$$

где  $\eta_{ту}$  – КПД технологического узла установок.

Эмпирические значения интегрального КПД технологического узла в функции от удельной массы снаряда для некоторых случаев ГДШ представлены на рис 7 [6], здесь  $m_{сн,уд}$  – удельная масса снаряда, т.е. отношение массы снаряда к площади его поперечного сечения.



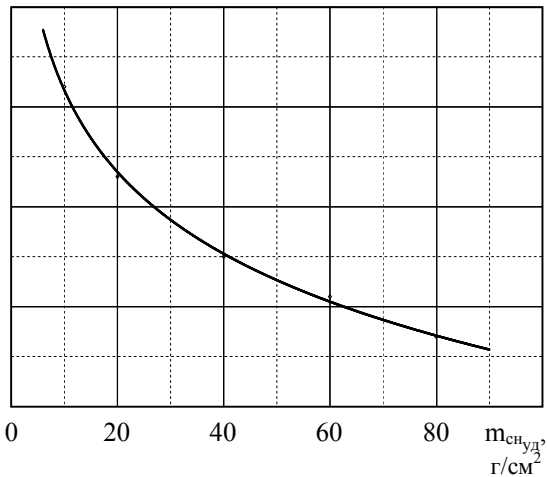


Рис. 7. Зависимость КПД технологического узла  $\eta_{\text{ТУ}}$  от удельной массы снаряда  $m_{\text{сн}_{\text{уд}}}$

### 5. Дульная скорость снаряда и энергетические системы его разгона

Суммарная работа  $A_{\Sigma}$  (сумма всех энергетических затрат в гидравлической камере) должна быть равна кинетической энергии снаряда  $E_{\text{сн}}$  на дульном срезе ствола (15). В свою очередь кинетическая энергия летящего снаряда  $E_{\text{сн}}$  определяется известным выражением вида

$$E_{\text{сн}} = \frac{m_{\text{сн}} v_{\text{д}}^2}{2}, \quad (30)$$

где  $m_{\text{сн}}$  – масса снаряда;

$v_{\text{д}}$  – дульная скорость снаряда на срезе ствола.

Потребная дульная скорость  $v_{\text{д}}$  определяется из выражения (30). После преобразований с использованием соотношений (15), (27), (29) выражение определения величины  $v_{\text{д}}$  примет вид [6]:

$$v_{\text{д}} = \sqrt{\frac{2}{m_{\text{сн}} \eta_{\text{ТУ}}} \left( \frac{p_2^2 W_0}{2E_{\text{ж}}} + \frac{p_1 + p_2}{2} W_{\text{ш}} \right)}. \quad (31)$$

Для аналитического определения энергии снаряда  $E_{\text{сн}}$  или его дульной скорости  $v_{\text{д}}$  необходимо провести баллистический расчет энергетического узла гидроударной установки для ГДШ, или использовать готовую баллистическую характеристику конкретной модели, приведенную в ее техническом паспорте.

Баллистическая характеристика гидроударной установки показана на диаграммах зависимости между массой снаряда  $m_{\text{сн}}$  его скоростью  $v_{\text{д}}$  и значениями, определяющими величину запасенной энергии.

Принципиально как источники энергии для разгона снаряда в установках ГДШ возможно использование: горения порохов; расширения сжатого воздуха; испарения сжиженного газа; расширения перегретого пара; горения газо- или топливоздушных смесей; детонационного горения газокислородных смесей; химического разложения энергоносителей с выделением газообразных продуктов; вакуумирования подснарядной полости; электромагнитных систем (линейных двигателей или магнитодинамических устройств); энергии различных механических систем (динамических, упругих, инерционных); гравитационных и прочих систем разгона снаряда.

Все эти энергетические системы по принципу воздействия на рабочее тело (снаряд) можно подразделить на группы, принцип работы которых основывается на использовании: энергии теплового расширения газов, электрического тока или электромагнитного поля, механических передач и гравитационных сил [2, 9].

Анализ технологических возможностей оборудования с различными энергетическими системами показал, что тепловой привод наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к энергоприводам импульсных ствольных установок для ГДШ.

Таблица 2

Характеристики используемого гидроударного оборудования типа «пресс-пушки»

Модель пресс-пушки	Калибр ствола, мм	Максимальный заряд пороха, г	Запас жидкости в камере, см <sup>3</sup>	Размер технологического блока, мм	Располагаемая энергия, кДж
ПП2	60	20	750	600×800	18
ПП5	50	15	500	450×250	10
ПП6	60	16	600	600×300	25
ПП7М	35	8	350	300×250	8
ПП8	60	16	600	500×300	31
ПП9М	80	40	2000	600×800	80
ПП11М	80	35	1400	650×570	55

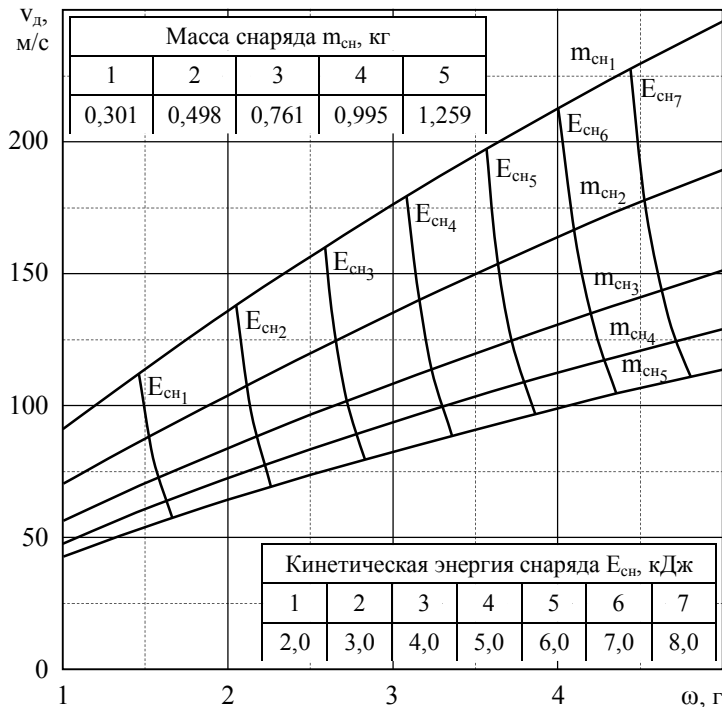


Рис. 8. Баллистическая характеристика пресс-пушки ПП7М

В процессах гидродинамической штамповки на пресс-пушках в качестве энергоносителя для разгона снаряда в настоящее время наиболее широко используются пороха, обладающие в сравнении с другими тепловыми энергосистемами, наивысшими удельными энергетическими параметрами.

Характеристики некоторых моделей пресс-пушек приведены в табл. 2 [2].

Однако пороховому приводу присущи и ряд недостатков, обусловленных требованиями социальной и экологической безопасности, что ограничивает область использования порохов. Это приводит к необходимости поиска новых альтернативных источников энергии и устройств разгона снаряда, удовлетворяющих требованиям ГДШ.

Баллистическая характеристика пороховой пресс-пушки – диаграмма зависимости между массой снаряда  $m_{сн}$  его скоростью  $v_d$  и весом порохового заряда  $\omega$  [1, 6].

В качестве примера на рис. 8 представлена баллистическая характеристика пресс-пушки ПП7М.

В производственных процессах определение величины потребного энергетического заряда используемой гидроударной установки достигается путем последовательного приближения по представленной выше методике с последующей коррекцией и уточнением экспериментально.

## Выводы

Инженерная оценочная методика определения энергосиловых параметров процессов ГДШ необхо-

дима для оценки возможности использования операций гидродинамической штамповки в изготовлении изделий трубопроводных систем ЛА, а также для определения в первом приближении энергосиловых параметров процесса и характеристик НДС детали.

Определение энергосиловых параметров процессов ГДШ осесимметричных деталей трубопроводов сводится к следующим действиям:

1. Расчет объема жидкости  $W_0$  в гидравлической формирующей камере – выражение (1); преобразование объема жидкости в процессе штамповки – соотношения (2), (4).

2. Расчет величины потребного давления жидкости  $p$  в камере – система уравнений (7 – 9); определение давления жидкости при ее сжатии – уравнение (5) или (6).

3. Определение характеристик НДС заготовки в процессе деформирования – система уравнений (7 – 9) и соотношения (10 – 14).

4. Расчет суммарной работы, выполняемой в гидравлической камере, работы сжатия жидкости  $A_{ж}$  и деформирования заготовки  $A_{д}$  – выражения (16), (19), (21) и (23 – 29) или с использованием графических зависимостей (рис. 6, 7).

5. Расчет потребной кинетической энергии снаряда  $E_{сн}$  и его дульной скорости  $v_d$  (при заданном значении массы снаряда  $m_{сн}$ ) – формулы (30) и (31).

6. Определение по баллистической характеристике используемого гидроударного оборудования величины потребного энергетического заряда.

Инженерная методика определения параметров ГДШ носит оценочный характер и при практической реализации операций гидродинамической штамповки требует либо экспериментального уточнения и коррекции энергосиловых параметров процесса, либо построения уточняющей математической модели с использованием современных систем САЕ.

## Литература

1. Мацукин Ю.Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мацукин Юрий Григорович. – Х., 1966. – 223 с.

2. Брагин А.П. Гидродинамическая штамповка на пресс-пушках, как одно из направлений импульсной обработки материалов давлением / А.П. Брагин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 296-304.

3. Мельничук А.П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование прин-

ципиального подхода к решению задач деформирования тонкостенных осесимметричных оболочек / А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 1 (48). – С. 36-39.

4. Кривцов В.С. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке / В.С. Кривцов, А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2001. – Вып. 25. – С. 28-34.

5. Руководящий технический материал: Производство сварного высокоресурсного трубопровода. РТМ 1.4.1999-90 – М.: НИИТ, 1991. – 234 с.

6. Мильченко Е.И. Исследование, разработка и внедрение технологических процессов изготовления высокоресурсного особотонкостенного титанового трубопровода воздушных систем ЛА: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мильченко Евгений Иванович. – Х., 1981. – 149 с.

7. Кривцов В.С. Анализ некоторых результатов научных и производственных исследований процессов гидродинамической штамповки элементов трубопроводов воздушных систем самолетов / В.С. Кривцов, А.П. Брагин, А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – Вып. 38. – С. 6-13.

8. Мельничук А.П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных осесимметричных оболочек / А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 3 (50). – С. 41-46.

9. Мельничук А.П. Возможные принципиальные схемы создания внешней нагрузки в перспективных установках для гидродинамической штамповки / А.П. Мельничук // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов* – 2006. – № 1 (44). – С. 137-140.

Поступила в редакцию 9.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов М.Е. Тараненко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

#### РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВІДІВ

*О.П. Мельничук*

На етапі оцінки можливості використання тих або інших технологій у виробництві раціональним є застосування спрощених інженерних методик визначення характеристик процесу. Систематизована методика оцінного визначення параметрів процесів гідродинамічного штампування вісесиметричних деталей трубопроводів необхідна для визначення можливості використання цих операцій у виготовленні виробів трубопроводних систем, а також для розрахунку в першому наближенні енергетичних та силових витрат і характеристик напружено-деформованого стану деталі. Визначення енергосилових параметрів гідродинамічного штампування включає розрахунок основних складових процесу: об'єму рідини у камері; величини необхідного тиску рідини; напружено-деформованого стану заготовки; роботи стиснення рідини і деформації заготовки; необхідної кінетичної енергії снаряда та його дульної швидкості.

**Ключові слова:** гідродинамічне штампування, технологічний процес, вісесиметрична деталь, об'єм, тиск, робота, енергія, швидкість.

#### DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHOD OF DETERMINATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF THE HYDRODYNAMIC STAMPING OF AXISYMMETRIC PIPELINE DETAILS

*A.P. Melnychuk*

At the stage of estimating the possibility to use one or another technology in the production cycle, it is rational to apply simplified engineering methods of determining process specifications. The systematized estimation method of determining the parameters of processes of hydrodynamic stamping of axisymmetric pipeline details is needed for estimating the possibility to use these operations in making of wares of pipeline systems, and also for calculating, at the first approach, power and power expenses and characteristics of the tensely-deformed state of a detail. Determination of energy-power parameters of the hydrodynamic stamping is taken to the calculation of the basic stages of the process: volume of liquid in a chamber; levels of the required liquid pressure; tensely-deformed state of purveyance; works of liquid compression and purveyance deformation; required kinetic shell energy and its muzzle speed.

**Key words:** hydrodynamic stamping, manufacturing process, axisymmetric detail, volume, pressure, work, energy, speed.

**Мельничук Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.