

УДК 621.7.044

А.П. МЕЛЬНИЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКОЙ

*Рассмотрен вопрос повышения точности изготовления тонкостенных деталей трубопроводов летательных аппаратов при гидродинамической штамповке. Определены характерные дефекты элементов трубопроводов, изготавливаемых гидроударными методами штамповки. Большая часть дефектов являются следствием нарушения режимов технологических операций или наличия дефектов в заготовках. Наиболее трудноисправимыми являются дефекты, обусловленные пружинением материала заготовки. Рассмотрен метод обеспечения требуемой точности детали за счет изменения скорости соударения заготовки с поверхностью матрицы. Характеристикой, определяющей отклонение размеров детали после прекращения действия нагрузки, является пружинение материала. При достижении оптимальной скорости соударения величина пружинения минимизируется за счет пластической деформации заготовки при ударе о матрицу.*

**Ключевые слова:** гидродинамическая штамповка, тонкостенный трубопровод, заготовка, матрица, скорость соударения, деформация, пружинение.

### Введение

Конструкции трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов изготавливаются преимущественно из титановых сплавов или коррозионно-стойких сталей.

Трубопроводы этих систем являются тонкостенными и изготавливаются методом сборки-сварки из набора унифицированных (прямолинейных и криволинейных) элементов и приварной арматуры (наконечников, переходников, вставок и т.д.) [1].

Одним из наиболее эффективных способов изготовления высокоточной приварной арматуры трубопроводов является гидродинамическая штамповка (ГДШ).

Формообразованием тонкостенных осесимметричных деталей энергией гидродинамического воздействия является процесс, при котором деформирование заготовок происходит под воздействием высокого давления гидродинамического нагружения, образующегося в жидкости при ударе о ее поверхность движущимся с большой скоростью снарядом (поршнем) [2].

Кратковременность процесса 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 трудно-деформируемых и высокопрочных сплавов, а отштампованные детали имеют высокую точность и чистоту поверхности.

### Основные дефекты тонкостенных деталей трубопроводов при ГДШ

Одной из основных причин, осложняющих интенсивное развитие в области ГДШ, является малая изученность динамических процессов, происходящих в энерготехнологических узлах установок гидроударного типа, отсутствие достаточно полных методик расчета параметров процессов и прочностных показателей штамповой оснастки. Это приводит к появлению дефектов при штамповке деталей.

Каждый из видов дефектов, характеризуется свойственными ему особенностями и причинами, вызвавшими его появление. В табл. 1 приведены наиболее распространенные дефекты тонкостенных осесимметричных деталей трубопроводов, изготавливаемых методами гидроударной штамповки, и перечислены основные причины, вызывающие их появление.

Такие дефекты, как образование гофров, складок, вмятин на поверхности деталей, недоштамповка элементов рельефа, разрушения в окружном и меридиональном направлениях, являются следствием нарушения режимов технологических операций или наличия дефектов в заготовках.

Таблица 1

Характерные дефекты в тонкостенных элементах трубопроводов воздушных систем ЛА при ГДШ

№	Вид дефекта	Возможные причины образования дефекта
1	Гофры, складки, вмятины	– попадание передающей жидкости в полость между матрицей и деталью; – воздушные пробки; – волновые процессы в передающей жидкости
2	Недоштамповка	– малая пластичность материала заготовки; – пружинение материала заготовки; – образование воздушных пробок; – попадание передающей жидкости между матрицей и деталью
3	Окружные и меридиональные разрывы	– не выполнена термообработка; – штамповка за один переход деталей с большой степенью вытяжки; – неправильное расположение волокон материала; – наличие концентраторов на заготовке (риски, царапины, вмятины, попадание посторонних частиц между заготовкой и матрицей); – при разрыве по шву – не выполнено упрочнение (усадка, проковка) сварного шва; – при разрыве в районе шва – не выполнена термообработка
4	Эллипсовидность	– эллипсность заготовки на этапе поставки; – разнотолщинность стенки заготовки по периметру; – неправильный выбор направления волокон в сварной заготовке; – раскрытие матрицы; – пружинение материала заготовки
5	Превышение размера отштампованной детали размеров матрицы	– недостаточная жесткость штамповой оснастки; – превышение допустимого значения внешней нагрузки; – неправильный зажим штампового блока; – пружинение материала заготовки
6	Отпечаток или разрыв по линии стыка полуматриц	– превышение допустимого значения внешней нагрузки; – недостаточная жесткость штамповой оснастки; – деформации силовых элементов оборудования; – неправильное зажатие штампового блока

Наиболее трудноисправимыми являются дефекты, обусловленные пружинением материала заготовки. Преодоление пружинения в деталях на производстве достигается путем увеличения формирующего импульса давления в гидравлической камере гидроударного оборудования. Однако, это зачастую приводит к образованию отпечатка стыка полуматриц на поверхности детали.

### Повышения точности тонкостенных деталей трубопроводов при ГДШ

Процесс деформирования заготовки при импульсном нагружении можно разбить на три основных этапа [2]:

- ускоренное движение заготовки под действием импульса давления в передающей среде.
- свободное деформирование заготовки за счет приобретенной на первом этапе кинетической энергии.
- соударение заготовки с поверхностью матрицы и пружинение.

Заключительный, третий этап деформирования заготовки является калибровочным.

Операция калибровки, как правило, выполняется на той же оснастке и оборудовании, что и формовка. Отклонение профиля детали от профиля матрицы для классических схем импульсной калибровки является прямым следствием процесса упругой разгрузки (пружинения) материала заготовки. Это нежелательное явление в большей степени характерно для труднодеформируемых металлов и сплавов. Процесс упругой разгрузки материала заготовки описывается обобщенным законом Гука, из которого следует, что определяющими в данном процессе являются механические свойства материала заготовки, а также его напряженное состояние. Поэтому достижение заданной точности детали возможно либо посредством изменения схемы напряженного состояния материала детали, либо путем корректировки профиля матрицы.

Существует несколько способов интенсификации калибровочных процессов импульсной металлообработки, основанные на управлении напряженным состоянием материала трубчатой заготовки:

1. *Принудительная подача материала торцов заготовки* в зону деформирования. Этот способ наиболее эффективен при предельных значениях величины вытяжки материала заготовки. Недостатком данного приема является образование в деталях дефектов, вызванных влиянием инерционных сил торцевых частей заготовки – гофры, козырьки, складки. Кроме того сложным является процесс синхронизация торцевого воздействия и калибрующего импульса давления в гидравлической камере.

2. *Применения отражателей (центральных тел)* в процессах импульсной калибровки трубчатых деталей. Этот способ открывает хорошую возможность управления энергосиловыми потоками передающей жидкости в формующих камерах. Наиболее эффективно использование центральных тел при получении деталей со сложным рельефом, малыми переходными радиусами, большой локальной вытяжкой. Применение данного способа требует проведения дополнительных расчетов при конструировании штамповой оснастки, что связано с необходимостью точного построения профиля центрального тела для создания максимального эффекта отражения.

3. *Гидродинамическая мультипликация давления*, основанная на уменьшении объема формующей жидкости, сжимаемой до высоких давлений. Осуществляется этот процесс посредством дифференциального поршня, расположенного в гидравлической камере. Вследствие разности площадей поршня, величина давления в формующей камере значительно превосходит давление в нагружающей камере. Область применения этого метода ограничивается габаритами калибруемых деталей, поскольку увеличение объема камеры высокого давления требует значительного увеличения объема камеры низкого давления, что в значительной мере увеличивает металлоемкость оснастки.

Однако ни в одном из описанных способов интенсификации не учитывается упругопластическая разгрузка предварительно напряженной заготовки.

В работе [3] реализован метод, где требуемая точность детали обеспечивается подбором оптимальной скорости соударения заготовки с рабочей поверхностью матрицы. Характеристикой, определяющей отклонение размеров детали после прекращения действия нагрузки, является пружинение материала. В данном случае величина пружинения сводится практически к нулю за счет пластической деформации заготовки при ударе о матрицу.

Скорость соударения заготовки с поверхностью матрицы в этом случае рассчитывается по формуле

$$v_p = 2,1 \frac{a_b \varepsilon_s}{k_c}, \quad (1)$$

где  $a_b$  – скорость волн упругой деформации в материале заготовки;

$\varepsilon_s$  – величина упругой деформации заготовки;

$k_c$  – коэффициент, учитывающий акустическое сопротивление заготовки и матрицы (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента  $k_c$  для различных материалов заготовки

Материал матрицы	Материал заготовки	$k_c$
Инструментальная сталь	Сталь	0,50
	Титановый сплав	0,63
	Алюминиевый сплав	0,74

Однако в формуле (1) не учтена упругая деформация матрицы, способствующая дополнительному перемещению заготовки с разгрузкой из растянутого положения. Расчет упругой деформации матрицы производится по формуле [4]

$$\varepsilon_m = \frac{J}{\rho_m \omega r_b^2 \ln \frac{r_H}{r_B}}, \quad (2)$$

где  $J$  – импульс давления;

$\rho_m$  – плотность материала матрицы;

$\omega$  – частота собственных колебаний матрицы;

$r_H, r_B$  – наружный и внутренний радиусы матрицы соответственно.

Величина частоты собственных колебаний матрицы определяется выражением

$$\omega = \sqrt{\frac{2G}{\rho_m} \cdot \frac{r_H^2 - r_B^2}{r_H^2 r_B^2 \ln \frac{r_H}{r_B}}}, \quad (3)$$

где  $G$  – модуль упругости второго рода материала матрицы.

Тогда при любой скорости соударения  $v_c < v_p$  отклонение наружного диаметра детали от номинального диаметра матрицы определяется выражением [5]

$$\Delta D = 2r_b \left( -\varepsilon_s + k_c \rho \delta v_c^2 + \varepsilon_m \right), \quad (4)$$

где  $v_c$  – текущая скорость соударения заготовки и матрицы;

$\delta, \rho$  – толщина и плотность материала заготовки;

$$k_c = \frac{\varepsilon_s}{\rho \delta v_p^2}, \quad (5)$$

где  $v_p$  – расчетная по формуле (1) скорость соударения заготовки и матрицы;

Решая (4) относительно  $v_c$  определяется минимальная скорость соударения, при которой величина пружинения будет в пределах поля допуска

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{k_{ср} \delta} \left( \frac{\Delta D}{2r_B} + \varepsilon_s - \varepsilon_m \right)}. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости величины пружинения заготовки из алюминиевого сплава АК4-1 от скорости ее соударения с матрицей [3], где видно, что предельная величина скорости соударения, обеспечивающая требуемую точность детали, находится в диапазоне 170...210 м/с.

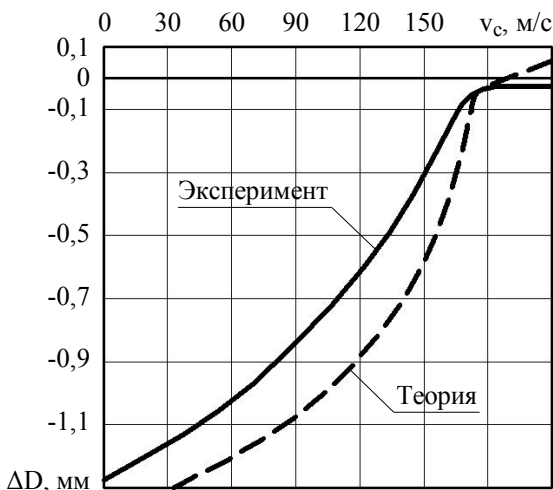


Рис. 1. Зависимость величины пружинения заготовки из алюминиевого сплава АК4-1 от скорости соударения с матрицей

Однако следует заметить, что при превышении скорости соударения свыше определенной предельной величины происходит “пластическое сращивание” заготовки с металлической матрицей. Поэтому

максимальная скорость подхода заготовки к поверхности матрицы не должна превышать  $v_{пр}$ . В работе [6] представлены экспериментально полученные значения предельных скоростей соударения заготовок из различных материалов со стальной матрицей (табл. 3).

Таблица 3  
Значения предельной скорости соударения  $v_{пр}$  для различных материалов заготовки

Материал матрицы	Материал заготовки	$v_{пр}$ , м/с
Инструментальная сталь	Сталь	250
	Титановый сплав	320...350
	Алюминиевый сплав	200

При невозможности обеспечить заданную точность детали при  $v_c \leq v_{пр}$  следует скорректировать в сторону увеличения диаметр матрицы, компенсируя этим пружинение детали после снятия нагрузки.

Собственно процесс контакта заготовки с поверхностью матрицы, в свою очередь также можно разделить на три основных этапа (рис. 2):

- ускоренное движение заготовки под действием импульсного давления;
- пластический удар заготовки о поверхность матрицы;
- упругое восстановление (пружинение) детали.

Для удобства определения некоторых технологических параметров процессов ГДШ в работе [4] введены коэффициенты:

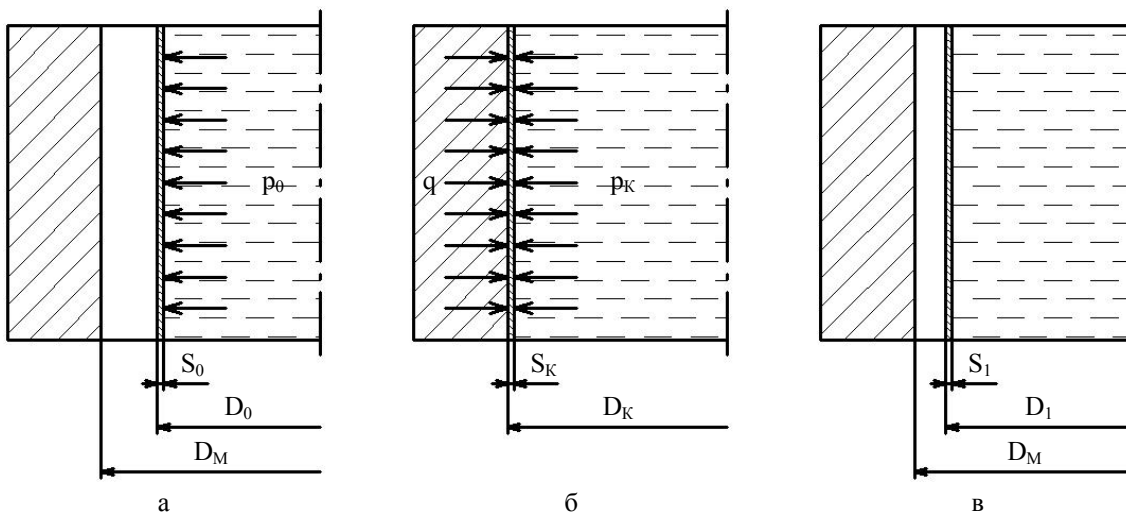


Рис. 2. Этапы контакта заготовки с поверхностью матрицы:

- а, б, в – ускоренное движение заготовки, пластический удар и пружинение соответственно;
- $S_0, S_K, S_1$  – толщина стенки заготовки до контакта, при ударе и после пружинения соответственно;
- $D_0, D_M, D_K, D_1$  – диаметр заготовки до контакта, номинальный диаметр матрицы, калибрующий диаметр матрицы при ударе и диаметр детали после пружинения соответственно;
- $p_0, p_K, q$  – начальное давление в гидравлической камере, давление в момент контакта и силы реакции в матрице соответственно

$$K = \frac{D_K}{D_0}; \quad K_1 = \frac{D_1}{D_0}; \quad K_2 = \frac{D_K}{D_1}, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент раздачи оболочки (рис. 3);

$K_1$  – коэффициент калибровки оболочки;

$K_2$  – коэффициент упругого ее восстановления.

Коэффициенты взаимосвязаны соотношением:

$$K = K_1 \cdot K_2. \quad (8)$$

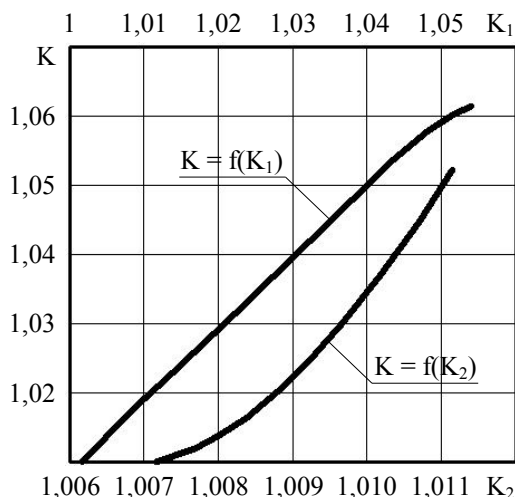


Рис. 3. Зависимость коэффициента раздачи оболочки  $K$  от коэффициентов калибровки  $K_1$  и упругого восстановления  $K_2$

Представленный способ повышения точности деталей, изготавливаемых ГДШ, дает возможность определения технологических параметров процесса штамповки в зависимости от механических свойств материала и геометрических размеров заготовки.

Экспериментальными исследованиями, представленными в работе [4] подтвержден сложный характер многоэтапного взаимодействия заготовки с матрицей при гидродинамической штамповке.

На рис. 4, а изображены экспериментальные зависимости влияния диаметра заготовки на значения остаточного его отклонения при ГДШ для различных материалов, где видно, что с ростом величины диаметра заготовки увеличивается и остаточное ее отклонение.

Рассмотрено влияние исходного зазора между матрицей и заготовкой на величину остаточного отклонения ее диаметра. На рис. 4, б показаны зависимости влияния исходного зазора на величину остаточного отклонения цилиндрических заготовок Ø100 мм, изготовленных из различных материалов. Здесь видно, что выбор оптимального исходного зазора заготовки способствует снижению величины ее остаточного отклонения.

Установлено, что увеличение импульса давления в гидравлической камере до определенного значения сопровождается уменьшением величины ос-

таточного отклонения детали, однако, при более высоких значениях давлений наблюдается увеличение остаточного отклонения. Для более пластичных материалов (АМг-2М, 12Х18Н10Т) диапазон оптимальных значений давлений значительно шире, чем для титанового сплава ТТ-7М (рис. 4, в).

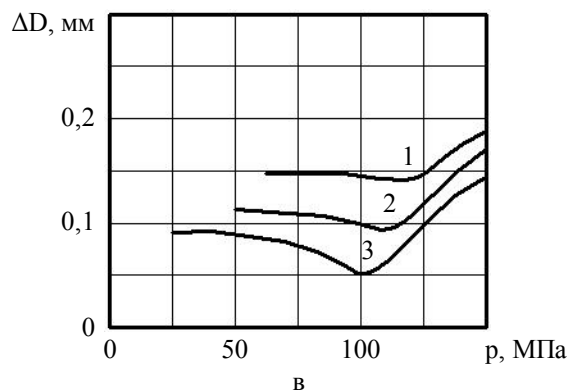
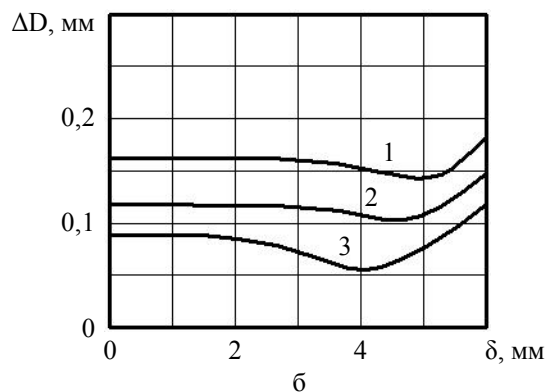
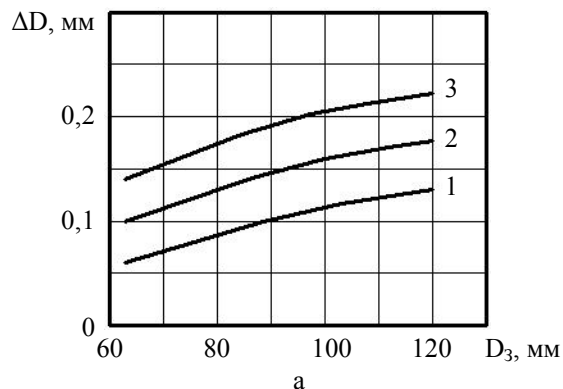


Рис. 4. Влияние некоторых параметров на величину остаточного отклонения диаметра оболочки:

а – зависимость остаточного отклонения от диаметра заготовки; б – влияние исходного зазора на величину остаточного отклонения; в – влияние давления в гидравлической камере на остаточное отклонение: 1 – титановый сплав ТТ-7М; 2 – сталь 12Х18Н10Т; 3 – алюминиевый сплав АМг2М

## Выводы

Рассмотрен метод обеспечения требуемой точности детали при ГДШ за счет изменения скорости соударения заготовки с поверхностью матрицы. Ус-

тановлено, что при достижении оптимальной скорости соударения величина пружинения минимизируется за счет пластической деформации заготовки при ударе о матрицу.

Подтверждена зависимость точности изготовления деталей при ГДШ от механических свойств материала, геометрических параметров заготовки и величины силового воздействия на нее в гидравлической камере.

### Литература

1. Мильченко, Е.И. Исследование, разработка и внедрение технологических процессов изготовления высокоресурсного особотонкостенного титанового трубопровода воздушных систем ЛА [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мильченко Евгений Иванович. – Х., 1981. – 149 с.
2. Мацукин, Ю.Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мацукин Юрий Григорович. – Х., 1966. – 223 с.
3. Громова, А.Н. Исследование механизма калибровки кольцевых деталей при импульсных процессах штамповки [Текст] / А.Н. Громова, В.С. Сотников, А.М. Шахназаров. – М.: НИИТ, 1973. – 25 с.
4. Белобородов, Р.А. Исследование, разработка и внедрение процесса гидроударной калибровки высокоточных элементов трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов в условиях серийного производства [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Белобородов Роман Александрович. – Х., 1991. – 201 с.
5. Муравьев, С.Д. Разработка, исследование и внедрение технологических процессов калибровки и рельефной формовки на гидродинамических пресс-пушках с интенсификацией внешней нагрузки в формующих камерах [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Муравьев Сергей Дмитриевич. – Х., 1985. – 184 с.
6. Завьялова, В.И. Теоретические и практические основы штамповки взрывом деталей авиационной техники [Текст] / В.И. Завьялова. – М.: НИИТ, 1971. – 42 с.

Поступила в редакцию 15.11.2011

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

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ СИСТЕМ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ЩО ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ ГІДРОДИНАМІЧНИМ ШТАМПУВАННЯМ

*О.П. Мельничук*

Розглянуто питання підвищення точності виготовлення тонкостінних деталей трубопроводів літальних апаратів при гідродинамічному штампуванні. Визначено характерні дефекти елементів трубопроводів, що виготовляються гідроударними методами штампування. Більшість дефектів є наслідком порушення режимів технологічних операцій або наявності дефектів у заготовках. Найбільш важковиправними є дефекти, що обумовлені пружинінням матеріалу заготовки. Розглянуто метод забезпечення необхідної точності деталі за рахунок зміни швидкості співзіткнення заготовки з поверхнею матриці. Характеристикою, що визначає відхилення розмірів деталі після припинення дії навантаження, є пружиніння матеріалу. При досягненні оптимальної швидкості співзіткнення величина пружиніння мінімізується за рахунок пластичної деформації заготовки при ударі об матрицю.

**Ключові слова:** гідродинамічне штампування, тонкостінний трубопровід, заготовка, матриця, швидкість співзіткнення, деформація, пружиніння.

## INCREASE OF PRECISION OF THIN-WALLED PIPELINE-PARTS FOR AIR SYSTEMS OF AIRCRAFTS MADE BY HYDRODYNAMIC STAMPING

*A.P. Melnychuk*

The question of increase of precision for thin-walled parts of pipelines was analyzed in the article. The typical defects of pipeline elements made by hydropercussion stamping methods were considered. The majority of defects is caused by breach of manufacturing operations routine or presence of defects in workpieces. The most hard-to-be-corrected are the defects which are caused by a springback effect. The required precision of parts guaranteeing method by change of workpiece impact velocity was analyzed. A springback effect is a property of material which determines the deviations of dimensions when the part is off-loaded. When an optimum impact velocity is reached, the springback is minimized due to plastic deformation of the workpiece during the impact to a die.

**Key words:** hydrodynamic stamping, thin-walled pipeline, workpiece, die, impact velocity, deformation, springback effect.

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