

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ ГИДРОФОРМОВКИ

И.А. Бурлаков, Д.М. Забельян, Ю.В. Колотов, Г.А. Мангасарян, Ю.А. Гладков

*В статье приведены данные о результатах применения технологического процесса гидроформовки для изготовления заготовок типа «сопло» из трубчатых заготовок. Показана конструктивная схема установки для формообразования данным методом. В работе приводится пример расчета технологических параметров и результаты моделирования процесса гидроформовки с помощью программы QFormVX.*

**Ключевые слова:** гидроформовка, трубчатые заготовки, сопло, никелевые сплавы, компьютерное моделирование, QFormVX.

## MACHINE COMPONENTS PRODUCTION FROM THIN-WALLED ROUND BILLETS BY THE HYDROFORMING TECHNIQUES

I.A. Burlakov, D.M. Zabelian, Yu.V. Kolotov, G.A. Mangasarian, Yu.A. Gladkov

*Research works of hydraulic forming processes for production of blanks for machine components of the «nozzle» type from round billets are considered. The structural design of the unit for this process as well as an example of process data calculation and results of computer simulation using QFormVX program are presented.*

**Keywords:** hydroforming, round billet, nozzle, nickel alloys, computer simulation, QFormVX.

### Введение

В авиационном двигателестроении широко используются детали типа «сопло», «переходник» и т.п., изготавливаемые из высокопрочных титановых и никелевых сплавов.

Анализ технологических процессов формообразования заготовок подобных деталей показал перспективность гидроформовки, которая характеризуется сжатием трубной заготовки в осевом направлении и подачей в ее внутреннюю полость жидкости высокого давления. Сжимающие и растягивающие напряжения приводят материал трубки в пластичное состояние, при достижении которого начинается формоизменение трубной заготовки в изделие. Таким способом изготавливают рамы для автомобилей и велосипедов, сильфоны, крутоизогнутые изделия для гидравлических систем авиационных моторов, крестовины, угольники и переходники для гидросистем самолетов, ракет, газовых и нефтяных трубо-

проводов. Гидроформовку применяют также для калибровки трубчатых изделий в штампах путем подачи в них жидкости высокого давления [1].

В отечественной промышленности применяют прессы для гидроформовки из труб переходных элементов рам велосипедов, для изготовления элементов гидросистем самолетов и ракет, установки для изготовления крутоизогнутых элементов авиационных моторов [2, 3].

Для реализации технологий с торцевым уплотнением трубки зарубежными фирмами Германии, Японии и США выпускаются специализированные прессы. На них формуется изделия из трубок с отношением толщины стенки ( $\delta$ ) к наружному диаметру трубки ( $d$ )  $\varepsilon = \frac{\delta}{d} \geq 0,1$ , так как при значениях относительной толщины стенки  $\varepsilon < 0,1$  трубки теряют локальную или осевую устойчивость ввиду большой осевой силы [4].

Цель настоящей работы состоит в разработке метода гидроформовки, позволяющего предотвращать потерю устойчивости длинномерных трубчатых заготовок при формовке.

**Разработка технологического процесса гидроформовки**

Рассмотрим типовую деталь в авиационном машиностроении (рис. 1), изготовленную из сплава ХН60ВТ с приведенными ниже механическими свойствами.

**Механические свойства сплава ХН60ВТ, %**

Температура испытания, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
20	$\leq 1050$	$\geq 400$	$\geq 40$

Изделия такого типа нередко изготавливаются сваркой двух половинок заготовки детали, полученных штамповкой. Они имеют сложную внутреннюю поверхность. Для достижения тре-

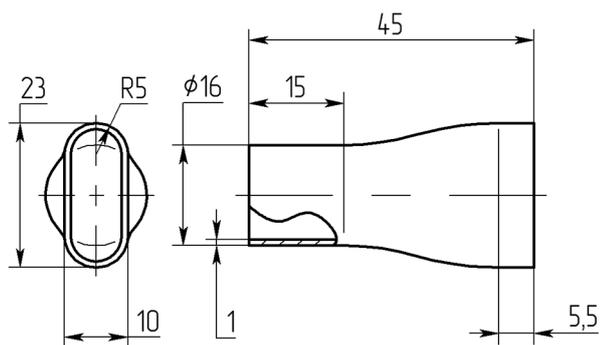


Рис. 1. Конструкция сопла из никелевого сплава ХН60ВТ

буемой чистоты поверхности требуется ручная зачистка наружного и внутреннего шва, что существенно усложняет технологию и повышает трудоемкость.

Для формообразования заготовок в нашем случае была разработана установка УГФ-01, в которой уплотнение трубки с высоким внутренним давлением жидкости осуществляется самоуплотняющимся радиальным уплотнением. Сила контакта материала уплотнения о внутреннюю поверхность трубки возрастает с увеличением давления формирующей жидкости. В установке УГФ-01, оснащенной таким радиальным уплотнением, сжимающие и растягивающие напряжения создаются в материале трубки одновременно с подачей рабочей жидкости. При этом напряжения не зависят друг от друга, что позволяет регулировать их величины и предотвращать потерю устойчивости трубки. Например, при формовке длинных трубчатых заготовок можно уменьшить осевую силу и, соответственно, снизить осевые напряжения, предотвращая, тем самым, потерю локальной устойчивости длинномерных трубчатых заготовок [5, 6]. В технологии с торцевым уплотнением для предотвращения потерь устойчивости увеличивают толщину стенки трубки, утяжеляя массу изделия. В устройствах типа УГФ (рис. 2 и 3) можно формовать тонкостенные изделия малой толщины, что способствует снижению металлоемкости формируемых изделий и узлов и машин в целом.

На рис. 2 устройство показано слева в исходном положении. При подаче жидкости под давлением через отверстие 11 в поршневую по-

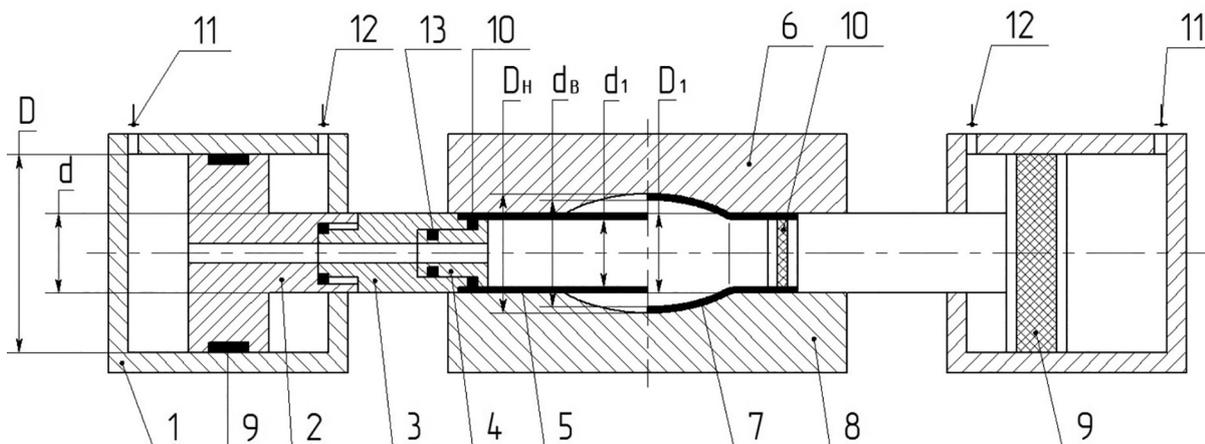


Рис. 2. Схема гидроформовки с радиальным уплотнением трубки:

- 1 – гидравлический цилиндр; 2 – шток с поршнем; 3 – пуансон; 4 – втулка; 5 – исходная трубчатая заготовка;
- 6 – верхняя полуматрица; 7 – готовое изделие; 8 – нижняя полуматрица; 9, 10, 13 – уплотнения;
- 11, 12 – точки присоединения систем гидропривода;  $D, d$  – диаметры поршня и штока 2;  $D_1, d_1$  – наружный и внутренний диаметры трубки;  $D_{н}, d_{в}$  – наружный и внутренний диаметры сопла (готового изделия)

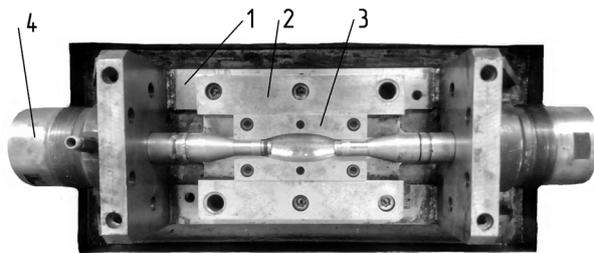


Рис. 3. Установка для гидроформовки УГФ-01 (со снятой верхней полуматрицей):

- 1 – рама; 2 – обойма; 3 – нижняя полуматрица; 4 – цилиндр гидроформовочный

лость цилиндра 1, штоок 2 перемещает уплотнение 10 внутрь трубки до упора втулки 4 в ее торец. Уплотнение внутренней полости трубки, заполненной жидкостью под высоким давлением, осуществляется самоуплотняющимся радиальным уплотнением 10. Сила контакта его материала о внутреннюю поверхность трубки создается за счет сжатия уплотнения 10 в поперечном направлении силой давления жидкости на некомпенсированную площадь втулки 4. Она равна разности площадей правого и левого торца втулки 4. Сила контакта уплотнения 10 о трубку возрастает с увеличением давления формирующей жидкости.

На установке УГФ-01 обрабатывался технологический процесс изготовления детали типа «сопло». Формообразование двух заготовок сопла из одной трубки осуществляется со степенями деформации 83,3 % за один переход. При этом при механической раздаче на внутренней поверхности трубки возникают риски от воздействия пуансона, которые устраняются в дальнейшем ручной доработкой до нужной чистоты поверхности. При раздаче трубки изнутри при формовке жидкостью не требуется ручной доработки ее внутренней поверхности, чистота которой в заготовке сопла после гидростатической формовки соответствует чистоте внутренней поверхности исходной заготовки, которая достигается

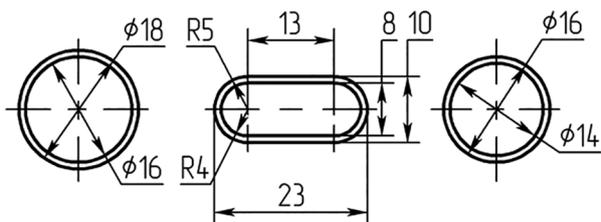


Рис. 4. Схема сопла:

- а – поперечное сечение входного отверстия,  
б – поперечное сечение выходного отверстия,  
в – поперечное сечение исходной заготовки

в трубке известными технологическими методами механической обработки, например, шлифованием.

Расчет технологического процесса был осуществлен двумя методами – аналитическим расчетом и компьютерным моделированием.

### Аналитический метод определения требуемого давления рабочей жидкости

Для расчета требуемого давления рабочей жидкости  $p_{ж}$  в установке УГФ-01 исходили из следующих данных:

- 1) размеры детали, как представлены на рис. 1;
- 2) материал детали – сплав ХН60ВТ;
- 3) деформация проходила при комнатной температуре;
- 4) предел текучести сплава  $\sigma_{0,2} = 400$  МПа.

Исходной заготовкой для осуществления первого перехода–сжатия трубки в поперечном направлении является трубка  $\varnothing 16 \times 1$  мм. Одна заготовка используется для изготовления двух деталей.

На первом переходе получают заготовку, приведенную на рис. 6, а.

Вторым переходом осуществляют раздачу трубки  $\varnothing 16 \times 1$  мм до размеров  $\varnothing 18 \times 1$  мм со степенью деформации  $\psi_1$  и увеличение конусной поверхности полуфабриката до размеров готового изделия со степенью деформации  $\psi_2$ . Тогда степень деформации при изготовлении готового изделия:  $\psi = \psi_1 + \psi_2$ .

Деформируемая площадь полуфабриката определяется по зависимостям в конической и цилиндрической части.

Зависимость в конической части

$$\psi_1 = \frac{S_n - S_{ГП}}{S_{ГП}}, \quad (1)$$

где  $S_n$  – площадь конической поверхности полуфабриката,  $S_{ГП} = 717,75$  мм<sup>2</sup>;  $S_{ГП}$  – площадь

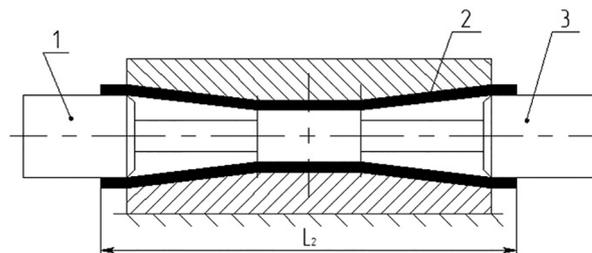


Рис. 5. Осадка исходной трубки в поперечном направлении: 1, 3 – пуансоны, 2 – полуфабрикат

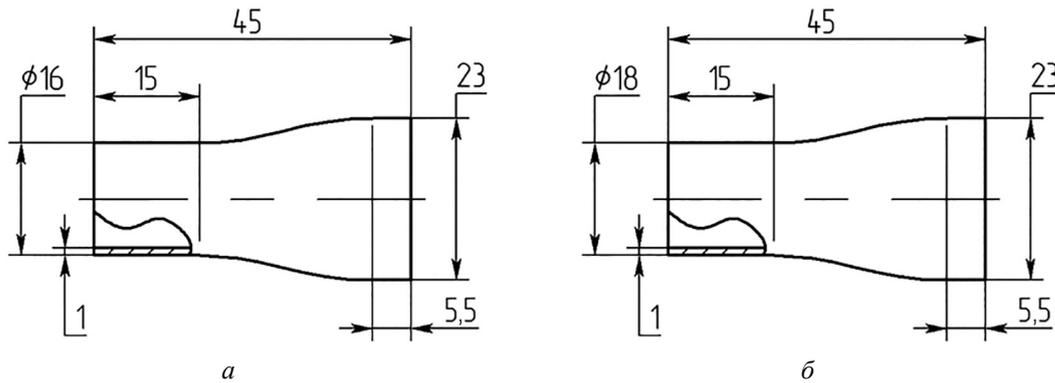


Рис. 6. Сечения полуфабриката после первого перехода (а) и готового изделия после резки полуфабриката (б)

той же поверхности готового изделия,  $S_{ГИ} = 772,25 \text{ мм}^2$ . Тогда  $\psi_1 = 0,075$ .

Зависимость в цилиндрической части

$$\psi_2 = (S_c - S_0)/S_0, \quad (2)$$

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения готового изделия,  $S_c = 53,4 \text{ мм}^2$ ;  $S_0$  – площадь поперечного сечения полуфабриката,  $S_0 = 47,12 \text{ мм}^2$ . Тогда  $\psi_2 = 0,133$ , а  $\psi = 0,208$ .

По степени деформации определяем напряжение текучести материала трубки по зависимости

$$\sigma_s = 0,9\sigma_B(1 + 2\psi). \quad (3)$$

После подстановки значений  $\psi$  получаем  $\sigma_s = 1,14\sigma_B$ .

С другой стороны,

$$\sigma_s = \sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (4)$$

При  $\sigma_2 = \sigma_3$  уравнение принимает вид

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2} \quad (5)$$

и имеет решение  $\sigma_s = \pm(\sigma_1 - \sigma_2)$  в виде двух корней:

$$\sigma_s = \sigma_1 - \sigma_2, \quad (6)$$

$$\sigma_s = -(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (7)$$

В уравнениях (4–7)  $\sigma_1 = -\frac{D_0^2 - d_1^2}{D_H^2 - d_1^2} p_{ж}$ , а  $\sigma_2 = \frac{D_H}{2\delta} p_{ж}$ , где  $D_0$  – диаметр поршня бокового цилиндра, примем его равным диаметру штока, т.е.  $D_0 = 45 \text{ мм}$ ;  $D_H$  – наружный диаметр цилиндра полуфабриката, т.е.  $D_H = 16 \text{ мм}$ ,  $d_1$  – внутренний диаметр цилиндрической части полуфабриката,  $d_1 = 14 \text{ мм}$ . Отсюда  $\sigma_1 = -30,5p_{ж}$ ,  $\sigma_2 = 8p_{ж}$ , где  $p_{ж}$  – давление рабочей жидкости в процессе формовки полуфабриката в готовое изделие на втором переходе.

При подстановке значений напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в уравнения (1 и 2)  $\sigma_s$  имеет отрицательное значение при знаке (+), т.е. они сжимающие, что противоречит действительности, и растягивающими при знаке (-) в уравнении (2) и равны  $\sigma_s = 38,5p_{ж}$ , что соответствует технологическому процессу. Отсюда

$$p_{ж} = \frac{1,14\sigma_B}{38,5} = 0,03\sigma_B = 31,5 \text{ МПа}. \quad (8)$$

### Метод компьютерного моделирования программой QForm VX

С целью уточнения технологических параметров процесса гидроформовки было проведено 3D-моделирование процесса формообразования детали из сплава ХН60ВТ с применением программы QForm VX.

Для моделирования процесса гидроформовки были разработаны твердотельные модели инструмента и исходной заготовки.

При моделировании в основу процесса были заложены следующие данные:

- обрабатываемый материал – жаростойкий и жаропрочный никелевой сплав на ХН60ВТ;
- исходная заготовка: трубка наружным диаметром 16 мм и толщиной 1 мм;
- материал инструмента – инструментальная сталь 5ХНМ;
- объем заготовки неизменный;
- температура формообразования – 20 °С;
- фактор трения – 0,1; трение по закону Леванова;
- тепловые процессы – не учитываются;
- максимальный размер элемента сетки разбиения – 0,5 мм;
- минимальное число слоев элементов – 2.

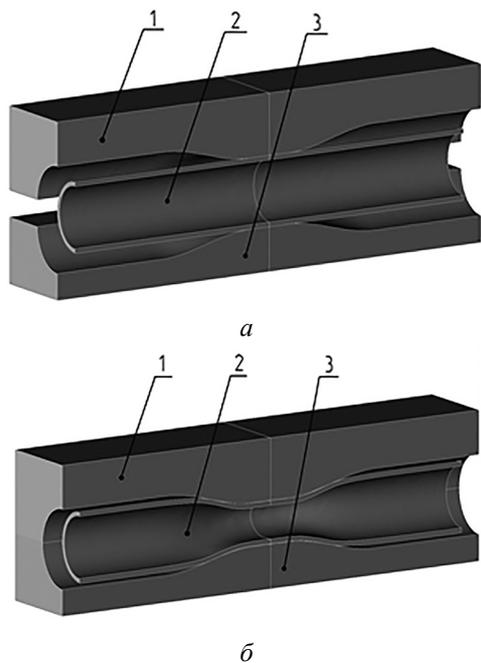
Моделирование формообразования детали осуществляли двумя операциями – предварительной осадкой (рис. 7) и гидроформовкой (рис. 8). При первом переходе производили сжатие трубки  $\varnothing 16 \times 1$  мм в поперечном направлении, а во втором переходе – гидравлическую формовку. Гидравлическая формовка выявила ряд особенностей, связанных с тем, что большая часть свободной поверхности заготовки деформируется приложением свободной силы, в результате чего процесс получается нестабильным (см. рис. 4).

Привод инструмента 1 (см. рис. 4) был задан как универсальное оборудование с постоянной силой, а давление на внутреннюю поверхность заготовки задали в соответствии с результатами расчета (8) 31,5 МПа.

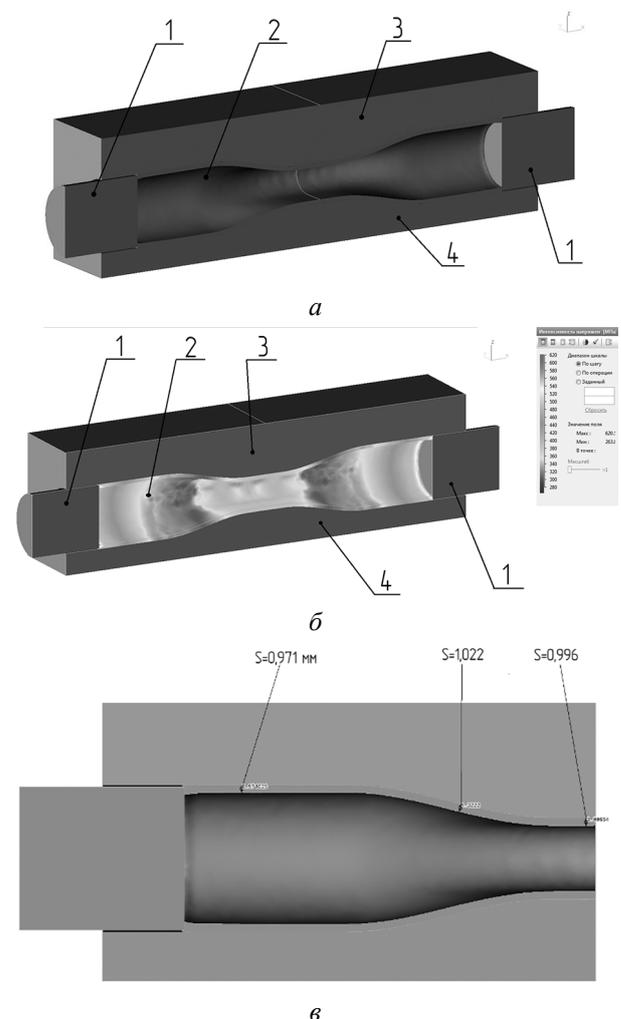
Кроме задания размера элементов и отключения переразбиения сетки, контролировался шаг расчета, так как после больших деформаций заготовки за шаг процесс решения останавливался.

Моделирование процесса гидроформовки детали позволило выявить, что во избежание потери устойчивости заготовки (образования складок из-за воздействия боковых пуансонов с излишне высокой скоростью или утонения стенки заготовки из-за излишне высокого да-

вления жидкости на внутреннюю поверхность) перемещение боковых пуансонов должно осуществляться графиком перемещения с постоянной скоростью, а давление на внутреннюю поверхность заготовки необходимо задавать постоянным, в нашем случае – 31,5 МПа. Величина пластической деформации не превышала 0,2, что существенно ниже пластичности исходного материала, что позволяет избежать разрушения металла. Моделирование позволило определить технологические режимы, обеспечивающие допустимое утонение (менее 10 %) (см. рис. 8), которое соответствует реальным данным, полученным на практике. Поэтому программу *QForm VX* целесообразно применять при проектировании таких сложных технологических процессов, как гидроформовка.



**Рис. 7. Твердотельная модель штампа с матрицей и заготовкой до деформации (а) и после осадки (б):**  
1 – верхняя полуматрица; 2 – заготовка;  
3 – нижняя полуматрица



**Рис. 8. Заготовка по результатам моделирования после операции гидроформовки:**  
а – геометрия заготовки, б – распределение пластической деформации; в – изменение толщины стенки детали по сечению; 1 – пуансон; 2 – деталь; 3 – верхняя полуматрица; 4 – нижняя полуматрица

### Выводы

На основе опыта отработки технологического процесса формовки изделия «сопло» установлена возможность применения установки УГФ-01 для изготовления деталей из тонкостенных трубчатых заготовок с отношением толщины стенки ( $\delta$ ) к наружному диаметру трубки ( $d$ ) при значениях  $\varepsilon < 0,1$ .

Приведенный аналитический метод позволяет определять требуемое давления рабочей жидкости  $p_{ж}$  в установке УГФ-01 для процесса гидроформовки.

Гидростатическую формовку целесообразно применять для изготовления изделий с высокими требованиями к разнотолщинности готовых изделий.

Результаты проведенных экспериментов показали возможность формовки изделия типа «сопло» из трубки со степенями деформации до 83,3 % без промежуточного отжига.

Для расчета технологических параметров процесса гидроформовки методом моделирования целесообразно применять программу *QForm VХ*.

### Заключение

Рассмотрев специальный вид обработки металлов давлением – гидроформовку, можно выделить ряд преимуществ этой технологии применительно к изделиям авиационного двигателестроения.

С помощью данного метода обработки достигается высокая точность геометрических размеров получаемого изделия, уменьшается количество операций в сравнении с классиче-

ской штамповкой, обеспечивается более равномерная толщина формованных деталей, чем при традиционных методах вытяжки давлением. Кроме того, гидроформовка заготовок деталей позволяет снизить трудоемкость их изготовления и повысить качество за счет исключения сварных швов.

### Список литературы:

1. Беляев А.А., Колотов Ю.В. Развитие методов гидроформовки изделий из трубчатых заготовок в СССР и современной России // КШО ОМД. 2009. № 1. С. 20–31.
2. Матвеев А.С., Антонов Е.А. Определение силовых параметров процессов гидроштамповки трубных заготовок в крутоизогнутые изделия // КШП. № 11. 1991. С. 8–11.
4. Семенов Е.И. Ковка и штамповка. Справочник. Т. 3. М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
5. Патент 2222399 Российская Федерация. Устройство для гидроформовки изделий из тонкостенных трубчатых заготовок / заяв. Колотов Ю.В. и др.; опубл. 2004, бюл. № 3.
6. Колотов Ю.В. Принцип работы и перспективы применения устройства для гидроформовки изделия из тонкостенной трубчатой заготовки с герметизацией ее торцов самоуплотняющимися уплотнениями // Перспективы развития отечественного кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств в условиях импортозамещения. Сборник докладов и научных статей XII Конгресса «Кузнец – 2015», Рязань, 2015. С. 242–252.

Материал поступил в редакцию 08.12.2017

**ЗАБЕЛЬЯН  
Дмитрий Михайлович**

E-mail: [Zabelyan@salut.ru](mailto:Zabelyan@salut.ru)  
Тел.: (499) 785-85-65

Заместитель главного инженера – главный технолог АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Сфера научных интересов: технологии авиационного двигателестроения. Автор двух монографий, более 29 научных статей и изобретений.

**БУРЛАКОВ  
Игорь Андреевич**

E-mail: [burlakov@salut.ru](mailto:burlakov@salut.ru)  
Тел.: (499) 785-81-59

Доктор технических наук, главный специалист УГТ АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Сфера научных интересов: изотермическое ротационное формообразование заготовок. Автор двух монографий, более 120 научных статей и изобретений.

**КОЛОТОВ  
Юрий Васильевич**

E-mail: [urvasi@inbox](mailto:urvasi@inbox.ru)  
Тел.: (910) 459-14-04

Доктор технических наук, профессор кафедры систем пластического деформирования Московского государственного технологического университета «Станкин». Сфера научных интересов: машины ударных действий и технология гидроформовки. Автор двух монографий, более 70 научных статей и изобретений.

**МАНГАСАРЯН  
Георгий Артемович**

E-mail: [George.M.A@yandex.ru](mailto:George.M.A@yandex.ru)  
Тел.: (985) 955-87-65

Магистрант кафедры обработки металлов давлением и аддитивных технологий Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: формообразование заготовок деталей из листовых материалов.

**ГЛАДКОВ  
Юрий Анатольевич**

E-mail: [gladyuri@qform3d.ru](mailto:gladyuri@qform3d.ru)  
Тел.: (499) 643-04-53

Кандидат технических наук, руководитель отдела ООО «Кванторформ». Сфера научных интересов: исследования в области моделирования процессов ОМД. Автор более 40 научных статей и изобретений.