

УДК 621.22

А.П. Брагин, В.Е. Зайцев, С.А. Полтарушников

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПЕРФОРИРОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

На основании проведенных исследований доказана возможность беспуансонной групповой пробивки гидродинамической штамповкой отверстий в трубчатых заготовках с определенными ограничениями, связанными с прочностью оснастки, которая при нагружении изнутри давлением свыше 500 МПа деформируется пластически. Разработан ряд новых принципиальных схем беспуансонной групповой пробивки отверстий методом ГДШ, разработана теоретическая методика определения параметров внешней нагрузки для указанных процессов и разработана программа машинного счета.

**Ключевые слова:** гидродинамическая штамповка, трубчатая заготовка, групповая пробивка.

### Сущность процесса.

Энергетические характеристики технологических параметров гидродинамической штамповки ГДШ предполагают возможность эффективного ее использования и при реализации разделительных операций [1].

Наибольший интерес и вероятную перспективность представляет беспуансонная пробивка близкорасположенных отверстий в трубчатых элементах в процессе получения монолитных перфорированных трубок с повышенным коэффициентом прозрачности, без увеличения геометрических размеров и снижения прочности детали (рис. 1).

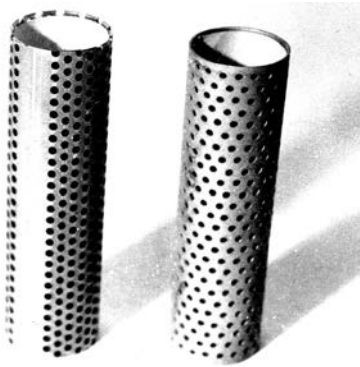


Рис. 1. Трубчатые фильтроэлементы, полученные из сварной заготовки (слева) и из трубы (справа) беспуансонной пробивкой отверстий методом ГДШ. Диаметры отверстий 2,2 мм

Потребность в деталях такого класса достаточно велика: это и детали фильтроэлементов различных систем авиационной техники, детали центрифуг и сепараторов, корпусов камер сгорания, детали ионно-оптических систем ионных двигателей космических летательных аппаратов и т.д.

В настоящее время еще нет достаточного опыта в изготовлении таких деталей, нет каких-либо корректных расчетных моделей, поэтому наиболее существенную роль может играть применение экспертных оценок по материалам имеющихся экспе-

риментальных результатов [2].

Импульсные методы обработки привлекательны для изготовления деталей подобного класса вследствие возможности пробивки за одну технологическую операцию всех отверстий одновременно.

Сущность беспуансонной пробивки отверстий заключается, согласно одной из схем, в разгоне заготовки до таких скоростей, при которых, вследствие удара ее о твердую формообразующую поверхность, локальные деформации превышают предельно возможные для данного материала, и происходит обрыв по периметру формозадающего контура.

### Экспериментальная оценка

Поисковые НИР и ОКР по данной тематике проводились в рамках общей программы ВНИИ «Гидропривод» по определению высокоэффективных методов изготовления перфорированных трубок новых конструкций фильтроэлементов. Экспериментально получены несколько партий образцов перфорированных трубок с отверстиями диаметром от 2,5 до 4 мм в трубчатых элементах из алюминиевых, латунных и стальных заготовок диаметрами от 27 до 30 мм толщиной до 1,2 мм беспуансонной пробивкой импульсным давлением жидкости (рис. 2).

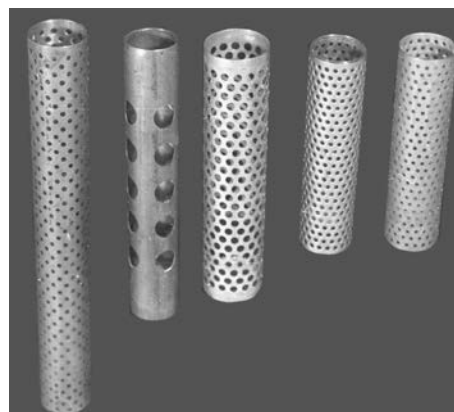


Рис. 2. Образцы перфорированных трубок, изготовленные методом ГДШ на пресс-пушках с располагаемой энергией до 20 кДж

Опробованы различные схемы взаимодействия заготовки и инструмента: пробивка отверстий метанием заготовки на пуансоны (рис. 3), пробивки по матрице с разгоном заготовки с нагружением изнутри, пробивки без разгона с нагружением изнутри – по наружной матрице, и с нагружением заготовки снаружи по матрице, помещенной вовнутрь заготовки.

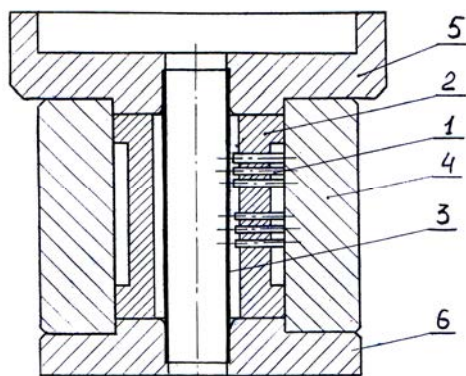


Рис. 3. Схема оснастки для пробивки отверстий метанием трубчатой заготовки на неподвижно установленные пуансоны: 1 – пуансоны, 2 – пуансонодержатель, 3 – заготовка, 4 – бандаж, 5 – опорное кольцо, 6 – основание

Пробивка отверстий метанием трубчатой заготовки на неподвижно установленные пуансоны осуществлялась на оснастке, показанной на рис. 3. Использовалась трубка с наружным диаметром 22 мм и толщиной стенки 0,5 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Нагружение осуществлялось на гидродинамической пресс-пушке ПП-2. В экспериментах осуществлена пробивка отверстий пуансонами диаметром 2,0 и 3,0 мм при ширине перемычки равной и более диаметра пуансона. Качество отверстий неудовлетворительное, т.к. в процессе пробивки отверстий осуществляется дальнейшая деформация заготовки, при которой в полость между заготовкой и обоймой попадала вода, вызывавшая коробление детали. При ширине перемычки, равной половине диаметра пуансонов, происходил разрыв трубы по перемычкам между пуансонами. Из-за очевидной бесперспективности, вытекающей из результатов эксперимента, работы по пробивке отверстий пуансонами по такой схеме были прекращены.

В дальнейшем обрабатывались экспериментально две основные безпуансонные силовые схемы: нагружение трубчатой заготовки давлением жидкости снаружи по матрице, располагаемой внутри заготовки, и нагружение трубчатой заготовки давлением жидкости изнутри по матрице, охватывающей заготовку (рис. 4) и помещенной в высокопрочный бандаж.

При этом обе схемы исследовались как при условии безззорного исходного контакта заготовки и матрицы, исключаяющей возможность разгона заготовки, так и при сборке пары заготовка – матрица с гарантированным зазором.

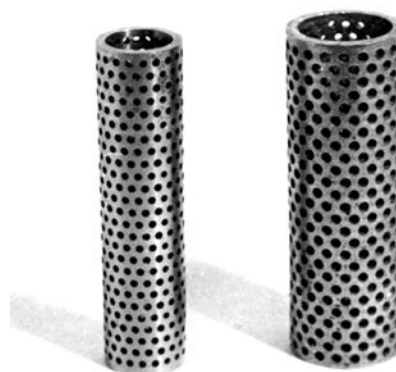


Рис. 4. Матрицы для гидродинамической пробивки отверстий: слева – для варианта нагружения заготовки снаружи, справа – для нагружения такой же заготовки давлением изнутри

Последнее обстоятельство обеспечивает ударное первичное взаимодействие сопряженных поверхностей обрабатываемого материала и инструмента. В этом случае можно предположить, что весь процесс деформирования единичного элемента заготовки в зоне пробиваемого отверстия условно проходит четыре принципиально отличающихся этапа.

1-й этап – пластическое деформирование трубчатого элемента до его контакта с инструментом – матрицей; 2-й этап – ударное соприкосновение сопряженных поверхностей, возникновение трения между ними; 3-й этап – начало выпучивания участка тела заготовки, ограниченного просветом отверстия матрицы, вовнутрь его, образование надреза по его контуру; 4-й этап – образование отхода («выдры») в заготовке от совместного действия давления нагружающей жидкости и инерционных сил, и ее выброс вовнутрь отверстия матрицы с большой скоростью, в ряде случаев до частичного сплющивания «выдры» от удара по ограничивающей поверхности матрицы.

Правомерность этого предположения подтверждается экспериментальными исследованиями зон деформирования ряда частично недоштампованных образцов (при недостаточной энергии нагрузки), когда на одной и той же трубчатой заготовке наличествовали как едва различимые следы кольцевых отпечатков краев отверстий матрицы, так и полностью качественно пробитые отверстия. При этом в большинстве отверстий оставались вырубленные элементы заготовки («выдры»), что дало возможность идентифицировать разделенные края «выдры» и соответствующие им отверстия в материале заготовки с целью анализа кинематики их разделения (разрыва). Осмотр деформированных участков производился с помощью бинокулярного микроскопа, что позволило детально и тщательно обследовать и следы обрыва материала по режущей кромке матрицы, и угонения в кольцевых утяжках.

Как известно, отличительной особенностью процесса гидродинамической пробивки отверстий является то, что нагрузка на заготовку создается им-

пульсным давлением жидкости, а не пуансонами. Это позволяет в значительной степени упростить конструкцию штамповой оснастки, производить пробивку отверстий на криволинейных поверхностях.

Ударом снаряда по жидкости, находящейся в замкнутой камере, внутри нее генерируется плоская ударная волна, нагружение трубчатой заготовки при этом происходит по мере прохождения ударной волны вдоль ее оси, различные сечения заготовки по вертикали нагружаются неодновременно. На рис. 5 представлена схема («а») и внешний вид оснастки («б») для пробивки в качестве оценочного эксперимента нескольких рядов отверстий Ø10 мм в латунной заготовке Ø29 мм и толщиной 1 мм.

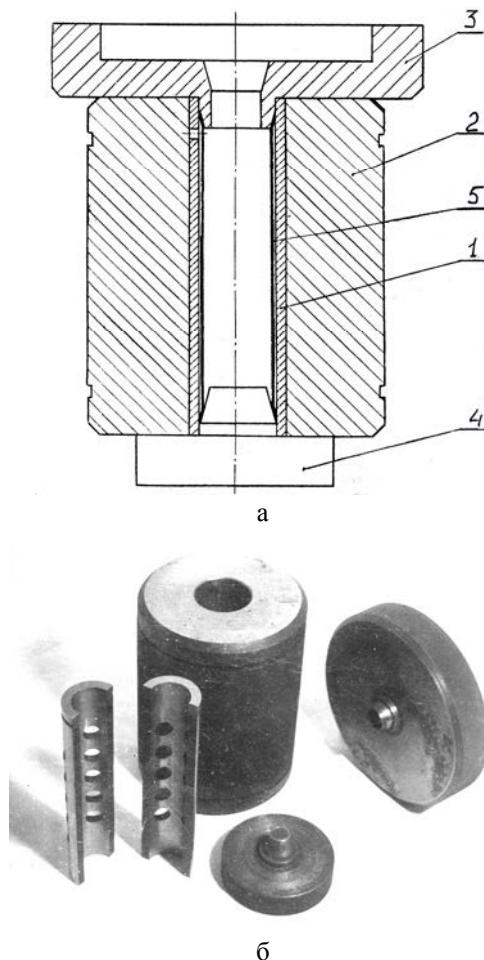


Рис. 5. Оснастка для пробивки отверстий с расположением заготовки внутри матрицы: а – схема; б - внешний вид 1 – матрица, 2 – бандаж, 3 – опорное кольцо, 4 – основание, 5 – заготовка

Рис. 6 иллюстрирует внешний вид отштампованной детали с элементами «выдры» в специально организованном оценочном эксперименте, который явно демонстрирует динамику прохождения волны давления внутри заготовки: на фото справа находится та ее часть, которая при штамповке располагается вверх; по форме выбитых из заготовки элементов можно представить их динамику движения внутри каналов матрицы.

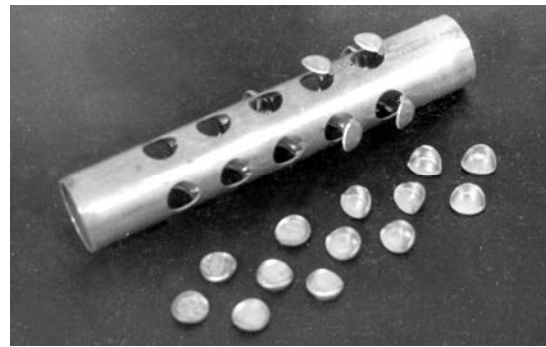


Рис. 6. Субъективная оценка результирующего воздействия волны давления по высоте заготовки. Справа на снимке – верхняя при штамповке зона

Одним из основных технологических параметров процесса гидродинамической пробивки отверстий является потребное для пробивки давление.

При пробивке отверстий в листовом материале возникает сложное напряженно-деформированное состояние. Для определения усилия пробивки в настоящее время нет теоретической убедительной концепции, поэтому на практике используют результаты и рекомендации экспериментальных исследований. В технологических расчетах применяют, например, условную величину – сопротивление срезу:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{P}{L \cdot \delta},$$

где  $P$  – усилие среза;  $L$  – периметр кромки отверстия;  $\delta$  – толщина материала.

Эта величина объединяет все силы сопротивления вырубаемого материала и автоматически учитывает упрочнение металла к моменту скола.

Экспериментальные исследования по определению сопротивления срезу в наших опытах не проводились, поэтому для анализа процесса гидродинамической пробивки приняты результаты исследований процесса пробивки отверстий в заготовках из листовой стали пуансонами.

В работе В.П. Романовского «Справочник по холодной штамповке» [3] установлена зависимость

$$\sigma_{\text{ср}} = (m \cdot \frac{\delta}{d} + 0,6) \cdot \sigma_{\text{в}},$$

где  $d$  – диаметр пробиваемого отверстия;

$m$  – коэффициент, зависящий от величины зазора  $S$  между пуансоном и матрицей.

При оптимальной величине двухстороннего зазора  $z = 0,15S$  коэффициент  $m = 1,2$ , а сопротивление срезу находится по формуле

$$\sigma_{\text{пб}} = (1,2 \cdot \delta / d + 0,6) \cdot \sigma_{\text{а}} \approx (1 + 2\delta / d) \cdot \sigma_{\text{д}}.$$

На основании вышеприведенных зависимостей усилие пробивки определяется как

$$P_{\text{д}} = \sigma_{\text{пб}} L \delta = \sigma_{\text{пб}} \pi d \delta = (1 + 2\delta / d) \cdot \sigma_{\text{д}} \pi d \delta.$$

Величина потребного давления для пробивки

$$q_{\text{д}} = 4P_{\text{д}} / (\pi d^2) = 4\sigma_{\text{д}}(1 + 2\delta / d) \cdot (\delta / d).$$

На рис. 7 представлена графическая зависимость отношения

$$q_{\text{пр}} \delta / \sigma_{\text{D}} = 4(1 + 2\delta/d) \cdot (\delta/d),$$

где  $q_{\text{пр}}$  – давление пробивки;  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести материала заготовки;  $\delta$  – толщина пробиваемого материала;  $d$  – диаметр пробиваемого отверстия, а на рис. 8 – требуемые давления для пробивки отверстий в исследуемых материалах: 1 – для нагартованной стали 20; 2 – для отожженной стали 20; 3 – для латуни Л62; 4 – для алюминиевого сплава Д16АМ.

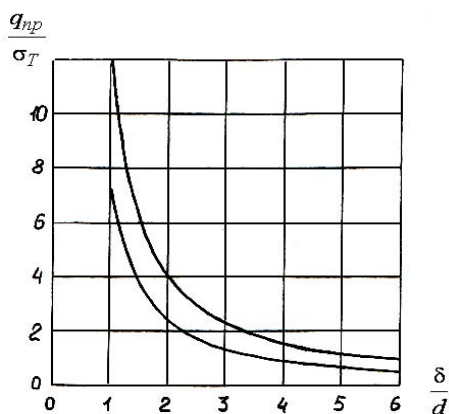


Рис. 7. Зависимость отношения давления пробивки к пределу текучести материала от относительной величины отверстия

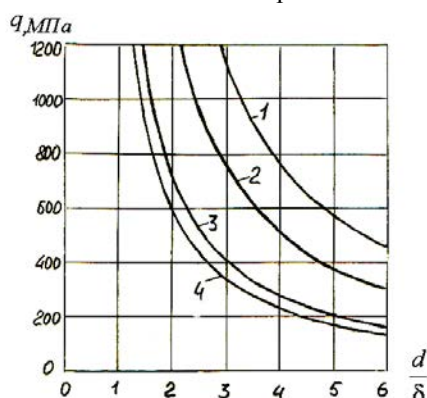


Рис. 8. Зависимость требуемого давления пробивки для различных материалов: 1 – сталь 20, нагартованная; 2 – сталь 20, отожженная; 3 – латунь Л62; 4 – алюминиевый сплав Д16АМ

Для справки:  $\sigma_{\text{в}}$  для сплава Д16АМ – 200...250 МПа, для латуни Л62 – 300 МПа, для стали 20 нагартованной – 420 МПа, для стали 20 отожженной – 390 МПа. Сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$  для сплава Д16АМ – 120...130 МПа, для стали 20 нагартованной – 360 МПа, для стали 20 отожженной – 330 МПа, для латуни Л62 – 260 МПа. Эксперименты по пробивке отверстий проводились на трубах с толщиной стенки 1 мм, при этом пробивались отверстия диаметрами 2,2, 2,5, 4 и 5,5 мм.

Пробивка отверстий может быть осуществлена за счет высокоскоростного соударения заготовки с

матрицей. При этом кинетическая энергия «выдры» должна равняться работе среза.

Приравняв эти величины, получим формулу

$$v_{\text{оа}} = \sqrt{4\sigma_{\text{ср}} / (\rho d)},$$

где  $v_{\text{уд}}$  – скорость единичного элемента.

Подставляя  $\sigma_{\text{ср}}$ , получим

$$v_{\text{оа}} = \sqrt{(8(1,2 \cdot (\delta/d) + 0,6) \cdot \sigma_{\text{а}} \cdot (\delta/d)) / \rho}.$$

График зависимостей требуемой скорости соударения заготовки с матрицей для осуществления пробивки отверстий для различных материалов приведены на рис. 9.

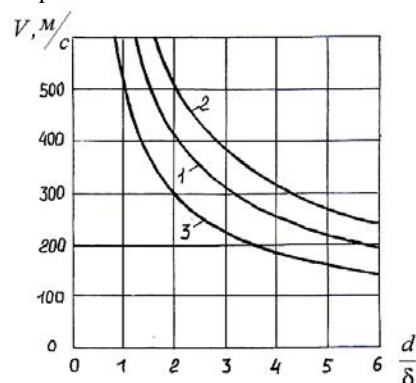


Рис. 9. Зависимость требуемой скорости подхода заготовки к поверхности матрицы при пробивке отверстий ударом: 1 – сталь 20, 2 – Д16АМ, 3 – латунь Л62

На практике достижение таких высоких радиальных скоростей заготовки при ГДШ связано с большими трудностями, к тому же из-за ослабления ударной волны (волны давления) распределение скоростей по высоте заготовки будет неравномерным. При меньших скоростях соударения пробивка отверстий не происходит, но возникающие пластические деформации на краях будущих отверстий заготовки способствуют снижению требуемого для пробивки отверстий давления – при втором штамповочном переходе. Для успешного осуществления процесса гидродинамической пробивки отверстий давление в жидкости должно превышать теоретически рассчитанное.

Величину требуемой энергии для создания внешней нагрузки в первом приближении можно определить с помощью энергетической методики, в основе которой лежит предположение, что вся кинетическая энергия снаряда расходуется на равномерное сжатие жидкости. Удельная внутренняя энергия сжатой жидкости определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{q + Bn}{\rho(n-1)} - \frac{Bn}{\rho_0(n-1)},$$

где  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия жидкости;  $q$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $\rho_0$  – начальная плотность жидкости;  $B$  и  $n$  – постоянные величины.

Для чистой воды  $B = 304,5$  МПа. Зависимость  $\varepsilon(q)$  показана на рис. 10.



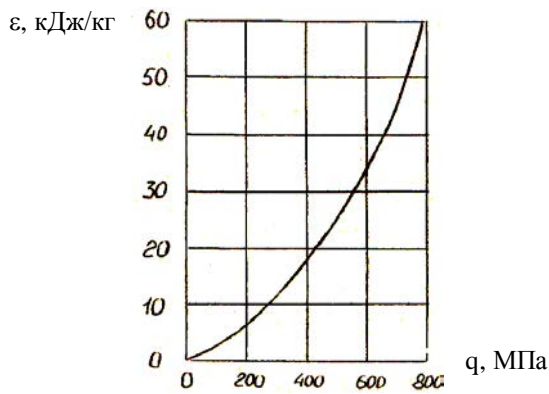


Рис. 10. Удельная внутренняя энергия сжимаемой среды

Полная энергия сжатой жидкости

$$E_{ж} = \varepsilon \cdot M_{ж},$$

где  $M_{ж}$  – масса сжимаемой жидкости.

Заряд пороха для пороховой пресс-пушки находится по баллистической характеристике конкретной установки. Для более точного определения параметров внешней нагрузки применялось численное моделирование на ЭВМ процесса гидродинамической пробивки отверстий. При расчете внешней нагрузки с учетом волновых процессов передающая среда считалась идеальной сжимаемой жидкостью.

Уравнения квазиодномерного движения ее записывались в виде

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{\partial \rho n S}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \rho n U}{\partial t} + \frac{\partial (q + \rho n^2) S}{\partial z} = q \frac{\partial S}{\partial z},$$

где  $z$  – осевая координата;  $t$  – время;  $U$  – скорость жидкости;  $S$  – площадь поперечного сечения канала;  $q$  – давление.

Замыкающим уравнением является уравнение состояния в форме Тэта:

$$P = \begin{cases} B \left[ (\rho / \rho_0)^n - 1 \right], & \rho > \rho_0; \\ 0, & \rho \leq \rho_0. \end{cases}$$

Уравнение движения снаряда записывалось

$$m_n \frac{d^2 z_n}{dt} = -P(z_n) S_n,$$

где  $m_n$  – масса снаряда;  $S_n$  – площадь поперечного сечения снаряда.

Усилие пробивки отверстия

$$Q_{ср} = \sigma_{ср} \cdot \pi \cdot d \cdot S.$$

Усилие со стороны жидкости на пробиваемый элемент заготовки

$$P_{ж} = q \cdot \frac{\pi d^2}{4}.$$

Уравнение движения пробиваемого элемента («выдры»):

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \delta \cdot \rho \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = P_{ж} - Q_{ср} \text{ при } P_{ж} > Q_{ср}.$$

Течение жидкости в зоне пробиваемого отверстия является трехмерным, однако влияние радиального движения жидкости на величину действующего на заготовку давления незначительно. Поэтому параметры внешней нагрузки можно определить в рамках модели квазиодномерного течения, при этом перемещение «выдр» учитывается осредненным изменением площади поперечного сечения камеры. Численное интегрирование системы уравнений осуществлялось методом Годунова.

На рис. 11 – 12 приведены в качестве примера некоторые результаты расчетов.

На рис. 11 представлены диаграммы, вдоль горизонтальной оси которых отмечено время пробивки рядов отверстий и графики распределения максимальных давлений по высоте заготовки. Расчет проводился для процесса пробивки отверстий диаметром 2,2 мм в трубке диаметром 29 мм с толщиной стенки 1,0 мм. Сопротивление срезу принималось равным 300 МПа. Геометрические параметры камеры определялись из условий эксперимента. Результаты на рис. 11 соответствуют нагружению на пресс-пушке ПП-2 снарядом весом 2,4 кг со скоростью 130 м/с.

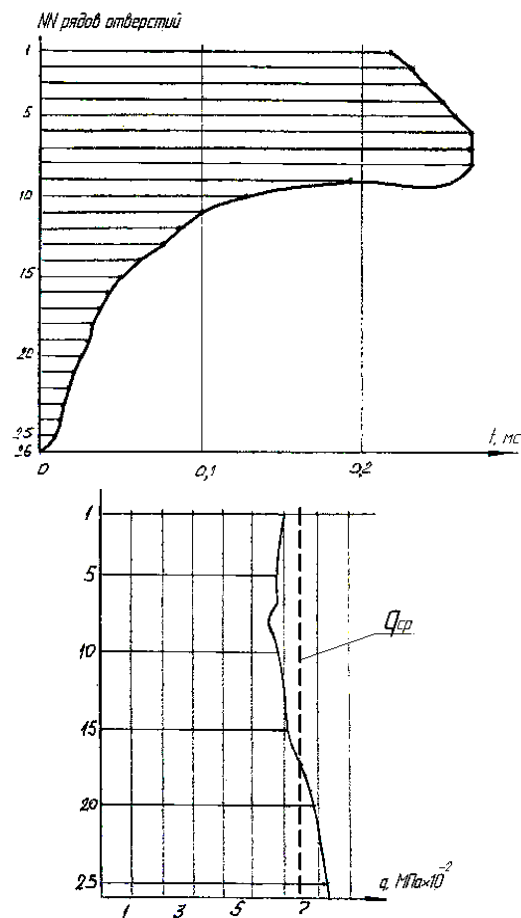


Рис. 11. Расчетное время пробивки рядов отверстий и распределение максимальных давлений по высоте заготовки; трубка диаметром 29 мм, толщина стенки 1,0 мм,  $\sigma_{ср}=300$  МПа%; нагружение снарядом весом 2,4 кг со скоростью 130 мс<sup>-1</sup>

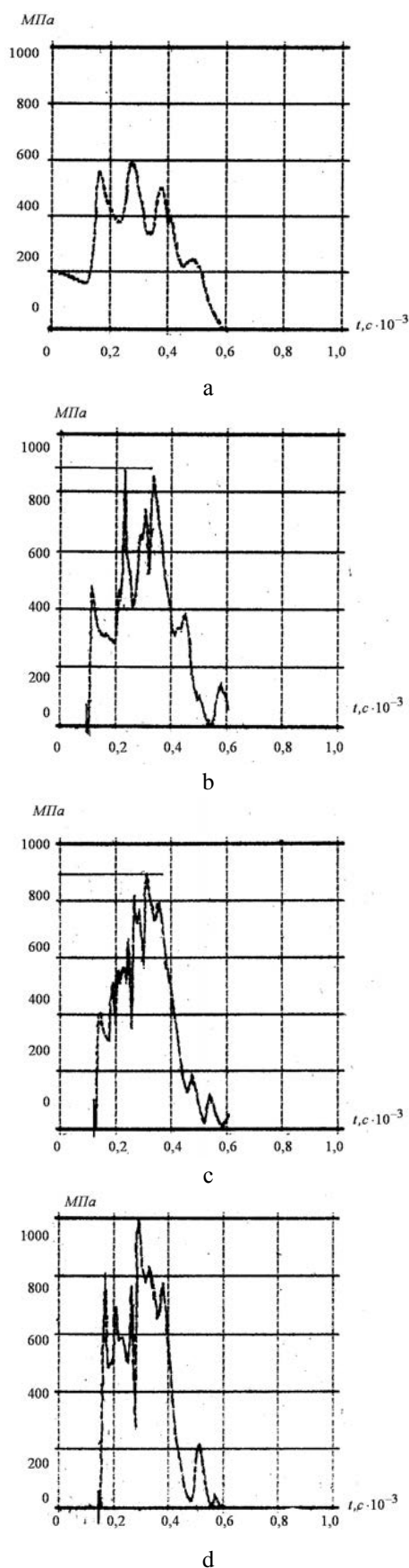


Рис. 12. Динамика развития волны давления жидкости внутри полости заготовки:  
 а – непосредственно под днищем снаряда;  
 б – в верхней части заготовки; с – в средней части заготовки; д – в нижней части заготовки

В первом приближении давление по высоте трубки можно считать равномерно распределенным; при этом необходимо уточненное решение для каждого конкретного случая, базирующегося на результатах исследования, иллюстрированного рисунками 12, а – д.

На рис. 12, а – д приведены расчетные графики зависимости давления (МПа) от времени (мс) перед снарядом (рис. 12, а) в верхней (рис. 12, б), средней (рис. 12, с) и нижней (рис. 12, д) частях заготовки.

В результате численного моделирования установлено, что распределение давления в камере и в полости заготовки является волновым процессом. В первую очередь нагружается верхняя часть заготовки, однако давление недостаточно для пробивки. При отражении волны от дна камеры давление возрастает, достигая 800 и более МПа, и начинается пробивка отверстий в нижней части заготовки. При движении отраженной волны вверх за счет увеличения объема при пробивке отверстий давление уменьшается. Поэтому максимальное давление в верхней части заготовки составляет 0,5...0,7 от действующего в нижней части заготовки. Нагружение заготовки является многоэтапным процессом, который повторяется с приходом отраженной от снаряда волны.

### Особенности технологической оснастки

Сложность и малая изученность процесса гидродинамической пробивки отверстий не позволяют теоретически определить технологические параметры процесса и сделать заключение об эффективности данной технологии. Поэтому основное внимание при выполнении данной работы уделялось экспериментальной обработке технологических процессов. Для этого были спроектированы комплекты технологической оснастки, в процессе обработки процесса выполнялись доработки.

Все детали, входящие в любой штамповый блок для гидродинамической штамповки, можно условно разделить на несколько функциональных групп. Главная из них – рабочие части, матрицы или пуансоны. Это детали штампов, в контакте с которыми происходит та или иная форма воздействия на заготовку. Они воспринимают все усилия, действующие на заготовку, и придают ей требуемую форму. От качества матрицы зависит качество детали. Материал матриц выбирается в зависимости от серийности штампуемых на ней деталей. Ими могут быть стальные сплавы 5ХНМ, 5ХНВ, Х12Ф1, 30ХГСНА, 18ХНВА с соответствующей термической обработкой и покрытием поверхности. Для увеличения стойкости рекомендуется азотирование, науглероживание и алитирование. Для матриц простой формы могут использоваться стали 40Х, 38ХМЮА и сталь 45. Мелкие детали допускается изготавливать из сталей У7 и У8. При этом следует обращать

внимание на условия работы матриц при мощных динамических нагрузках и не допускать высокой калки и отказа от низкотемпературного отпуска.

В следующую группу входят детали, образующие своими поверхностями полость формующей камеры, т.е. испытывающие на себе действие гидроударной нагрузки.

Если к ним не предъявляются специальные требования по сохранению формы, то их можно изготавливать из любых малоуглеродистых сталей; однако, если на этих деталях имеются посадочные пояса, то для сохранения точности посадки необходима соответствующая прочность, обеспечиваемая изготовлением из сталей 40, 45, 40X с последующей нормализацией.

Отдельно рассматриваются детали, несущие нагрузку по обеспечению монолитности многосекционных (двух- и более) штамповых блоков, или разъемных матриц. Это - конические бандажи, изготавливаемые из стали 35 с нормализацией и азотированием рабочих поверхностей.

Особое внимание при изготовлении разъемных матриц следует обращать на качество стыкующихся кромок - их притупление не допускается, т.к. приводит к браку в деталях, оставляя отпечатки на их поверхностях.

На рис. 13 показана оснастка для изготовления перфорированных трубок  $\varnothing 29$  мм длиной 250 мм с отверстиями  $\varnothing 3,0$  мм.

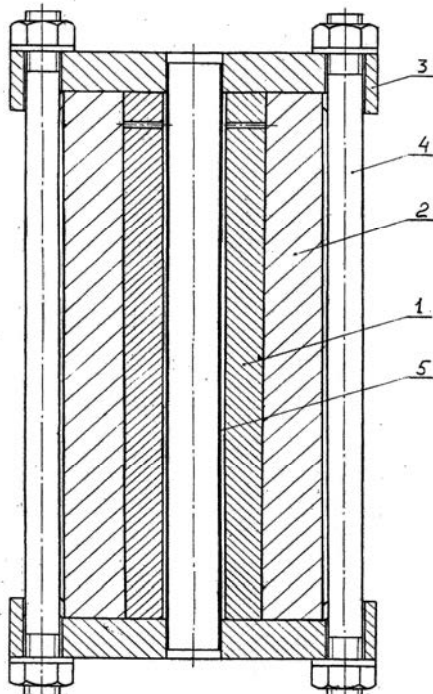


Рис. 13. Схема оснастки для перфорирования трубы линейным зарядом взрывчатого вещества

Матрица 1 выполнена с разъемом в вертикальной плоскости, наружная поверхность ее выполнена конической и запрессована в бандаж 2 с отверстием

такой же конусности. Два фланца 3 удерживают полуматрицы от смещения и одновременно центрируют трубчатую заготовку 5. Пустота заготовки заполняется водой, по оси заготовки устанавливается линейный заряд взрывчатого вещества, инициируемый электродетонатором.

Для экспериментальной проверки возможности пробивки отверстий с помощью неподвижно установленных пуансонов была спроектирована оснастка, показанная на рис. 3. Цилиндрические пуансоны 1 устанавливались в обойме 2 и упирались нерабочими торцами в бандаж 3.

Для определения технологических возможностей процесса в обойме было установлено несколько групп пуансонов разного диаметра с переменными расстояниями между их осями.

На рис. 14 показана типовая конструкция оснастки для пробивки отверстий в трубчатых заготовках, спроектированная для пресс-пушки ПП-2.

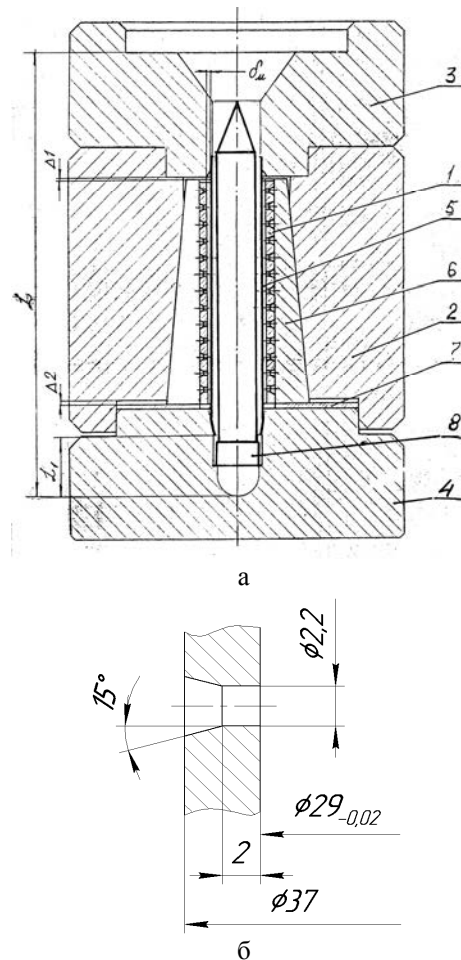


Рис. 14. Конструктивная схема оснастки с профилированными отверстиями матрицы и разрезной обоймой (а):

- 1 – тонкостенная матрица, 2 – силовой бандаж;
- 3 – кольцо опорное; 4 – основание с углублением рабочего канала; 5 – заготовка; 6 – разрезная обойма; 7 – прокладка; 8 – центральное тело;
- б – профиль рабочего отверстия для пробивки заготовки нагружением изнутри

Матрица выполнялась разъемной в вертикальной плоскости с цилиндрической наружной поверхностью, сопрягаемой с бандажом по посадке Н8/гб.

Материалы, рекомендуемые для изготовления матриц, сведены в табл. 1.

Кроме того, были заказаны матрицы из стали 40Х2НМА, которые затем подвергались азотирова-

нию. Для изготовления бандажей, обойм и других тяжело нагруженных деталей рекомендовались стали 30ХГСА, 40Х, 40Х2НМА, твердость 50...55 HRC<sub>3</sub>.

Фланцы и другие малоответственные детали изготавливались из стали 45, твердость 38...42 HRC<sub>3</sub>.

Таблица 1

Рекомендуемые материалы матриц для гидродинамической пробивки отверстий<sup>\*)</sup>

Материал	Режимы термообработки, °С		Твердость, HRC <sub>3</sub>
	Закалка	Отпуск	
1	2	3	4
55Х6ВЗСМФ	1060-1070	540-570	56-60
Х6ВФ	990-1010	190-210	58-60
Х12Ф1	1060-1080	150-170	62-64
ШХ15	830-850	180-230	56-60
11Х	830-860	140-160	62-65
У10А	770-780	140-160	62-64

\*) в порядке предпочтения

Наиболее нагруженными деталями оснастки для пробивки отверстий импульсным давлением жидкости являются матрицы и бандаж, представляющий собой толстостенные цилиндры, нагруженные внутренним давлением. Радиальные перемещения и напряжения для таких цилиндров определяются по известным формулам Ламе.

Легированные конструкционные стали имеют предел текучести 800...1000 МПа; полагая эти напряжения допускаемыми, приходим к выводу, что давление в камере не может быть выше 400...500 МПа. Поэтому прочность оснастки накладывает ограничения на технологические возможности процесса гидродинамической пробивки отверстий. Согласно графику на рис. 10, минимальные диаметры пробиваемых отверстий при толщине трубы 1 мм будут 2,2 мм для сплава Д16АМ, 2,5 мм для латуни Л62, 4 мм для отожженной стали 20 и 5,6 мм для нагартованной стали 20.

Повысить несущую способность элементов оснастки можно применением составных цилиндров, соединенных с натягом.

При отработке процесса на пресс-пушке было установлено, что основной причиной возникновения брака является попадание воды в полости матрицы и создание противодавления на заготовку. Затекание воды в полость матрицы возможно как перед нагружением из-за плохой герметизации, так и во время его, когда вода попадает в полость матрицы через зазоры, образующиеся при разделении металла. На-

глядно это было продемонстрировано при использовании в качестве передающей среды парафина: после выстрела парафин заполнил все зазоры между матрицей, обоймой и бандажом и часть радиальных отверстий матрицы. Непробитые отверстия, как правило, находятся в верхней части трубки, так как максимальное давление жидкости в этой зоне меньше, чем в нижней части, отверстия пробиваются в последнюю очередь, вероятность попадания воды в полости отверстия матрицы выше. Этому также способствовали конструктивно-технологические дефекты оснастки. Для обеспечения герметичности полости заготовки вначале нагружения была увеличена длина заготовки, на торцах матрицы выполнены режущие кромки. Обрезка припуска происходила одновременно временно с пробивкой отверстий.

Получить деталь из стали 20 на установке ПП-2 не удалось, так как пушка рассчитана на заряд пороха 20 г, а при увеличении заряда до 22 г 20 – 30% отверстий оставались непробитыми. Не дало положительных результатов применение более плотных передающих сред.

Осуществить пробивку всех отверстий в отожженной стальной трубке удалось на установке ПП-11М зарядом пороха 37 г. При этом внутрь заготовки вставлялось центральное тело для концентрации давления в верхней ее части. Пробивка отверстий производилась без обрезки торцов.

Готовые детали из стальных и латунных трубок представлены на рис. 2.



Несколько партий деталей было получено по схеме обжима на оснастке, показанной на рис. 15 и соответствующей ей схеме на рис. 13, а.



Рис. 15. Комплект оснастки под пресс-пушку ПП-2

Полученные детали имеют скругленные кромки пробитых отверстий со стороны наружной поверхности трубы.

Недостатком этой схемы пробивки является сложность разборки оснастки.

### Выводы

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать:

1. На основании проведенных исследований доказана возможность беспуансонной групповой пробивки гидродинамической штамповкой отверстий с относительными диаметрами  $\frac{d_{\text{отв}}}{\delta_{\text{заг}}} \geq 2 \dots 8$  в трубчатых заготовках диаметрами 22...35 мм из материалов с  $\sigma_B \leq 450$  МПа.

Практически достигнутый диапазон пробиваемых отверстий в трубках с толщиной стенки 1 мм и диаметром от 22 до 35 мм: для материалов с  $\sigma_B \leq 420$  МПа – 2,5 мм; с  $\sigma_B \leq 500$  МПа – 4 мм.

Ограничения связаны с прочностью оснастки, которая при нагружении изнутри давлением свыше 500 МПа деформируется пластически.

2. Разработан ряд новых принципиальных схем беспуансонной групповой пробивки отверстий методом ГДШ, разработана теоретическая методика определения параметров внешней нагрузки для указанных процессов и создана программа машинного счета, теоретически построены эпюры распространения волны давления в кольцевой камере, рассчитано поле давлений.

3. На основании результатов выполненных исследований получены рекомендации по проектированию технологической оснастки для серийного производства.

4. Опробованные технологические схемы перфорирования оставляют и возможность дальнейшего усовершенствования процесса в плане его интенсификации, путем увеличения его энергетических параметров, например, за счет мультипликации давления в формирующей камере.

### Список литературы

1. 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.
2. Кривцов В.С. Концепция создания технологических систем производства деталей летательных аппаратов с использованием импульсных методов обработки: дисс. ... докт. техн. наук: 05.07.04 / Кривцов В.С. – К., 1997.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1966. – 175 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, Харьковский НИИ технологии машиностроения, Харьков.

### ГІДРОДИНАМІЧНЕ ПЕРФОРУВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК

А.П. Брагін, В.Є. Зайцев, С.А. Полтарушніков

На підставі проведених досліджень доведена можливість беспуансонної групової пробивки гідродинамічним штампуванням отворів в трубчастих заготовках з певними обмеженнями, пов'язаними з міцністю оснащення, яке при навантаженні зсередини тиском понад 500 Мпа деформується пластично. Розроблений ряд нових принципових схем беспуансонної групової пробивки отворів методом ГДШ, розроблена теоретична методика визначення параметрів зовнішнього навантаження для вказаних процесів і розроблена програма машинного рахунку.

**Ключові слова:** гідродинамічне штампування, трубчаста заготовка, групова пробивка.

### HYDRODYNAMIC PERFORATION OF TUBULAR PURVEYANCES

A.P. Bragin, V.Ye. Zajtsev, S.A. Poltarushnikov

On the basis of the conducted researches possibility of unpunch of the group holing of openings the hydrodynamic stamping is well-proven in tubular purveyances with certain limitations, related to durability of rigging which at a loading from within by pressure over 500 Mpa is deformed plastic. The row of new of principle charts of unpunch of the group holing of openings is developed by the method of GDSH, the theoretical method of determination of parameters of the external loading is developed for the indicated processes and the program of machine account is developed.

**Keywords:** hydrodynamic stamping, tubular purveyance, group holing.