

УДК 621.983.044

Шамарин Ю.Е., д.т.н., проф., Холявик О.В., к.т.н., доц., Борис Р.С., к.т.н.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Shamarin Ju., Holiyavik O., Boris R.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (k_omd@ukr.net)

PULSE METHODS METAL FORMING

В работе рассмотрены импульсные методы обработки металлов давлением, которые по сравнению с традиционными методами ОМД имеют ряд преимуществ. Импульсные методы обработки позволяют значительно сократить сроки технологической подготовки производства. Кроме того, их применение предполагает использование упрощенной оснастки и универсального технологического оборудования. Все эти преимущества очень важны для мелкосерийного производства. Процесс электрогидравлической штамповки можно выполнять в обычных цеховых условиях. Возможно простое решение вопросов техники безопасности. Легко обеспечить точную регулировку энергии и многократное воздействие на заготовку с одной установки. До настоящего времени поведение металла при импульсных методах нагружения недостаточно полно изучены. Поэтому есть вероятность извлечения дополнительных резервов повышения эффективности этих методов.

***Ключевые слова:** импульсные методы, обработка металлов давлением, технологическое оборудование, мелкосерийное производство, высокоскоростные методы обработки, взрывная штамповка, взрывчатое вещество, взрыв, ударная волна, энергоноситель, фронт ударной волны, скорость детонации*

Одним из первых, кто использовал взрыв в металлообработке, был Чарльз Монро, который в 1888 г. описал метод выдавливания сложных узоров на железных плитах с применением зарядов прессованного пироксилина.

Первый патент, касающийся высокоскоростного деформирования, был оформлен в Англии в 1898 г. (№21840). Этот патент описывает технологию соединения труб при производстве велосипедов путем раздачи с помощью взрыва небольших зарядов взрывчатого вещества (ВВ).

Первый из известных патентов США был оформлен на имя Исаака Ньютона Джонса в 1909 г. (№939702). Этот патент касался использования ВВ для формообразования цилиндрических металлических деталей в матрице. В патенте не упоминается ни о воде как энергопередающей среде, ни о необходимости создания вакуума между заготовкой и матрицей. Патент, оформленный в 1961 г. (№ 2983242), принадлежит Д.У. Коуллу, включает в себя использование воды в качестве формирующей среды и создание вакуума между заготовкой и матрицей. Однако данный патент содержит главным образом описание конфигураций специальных прижимных колец. Более поздний патент по взрывной штамповке принадлежит В.У. Дреклиусу (1962 г., №3036373). В нем описаны такие параметры, как рабочее давление, продолжительность импульса и скорости деформирования.

Первое промышленное применение в США взрыва для формообразования можно отнести к 1950 г., когда фирма «Мур» сообщила о штамповке этим методом втулок электровентилляторов.

Наступление космической эры (примерно с 1955 г.) дало мощный толчок широкому промышленному внедрению процесса взрывной штамповки.

В СССР взрывная штамповка активно начала развиваться в конце 40-х годов. В 1949 г. Р.В. Пихтовников (г. Харьков) предложил способ штамповки деталей и устройство, для его осуществления, отличающийся от известных тем, что необходимое давление получают посредством взрыва в герметичной камере взрывчатых веществ. Отличительной особенностью устройства является то, что дно его камеры выполнено в виде диафрагмы, например, резиновой, между ней и матрицей размещается штампуемая заготовка.

На рис. 1. схематично изображено предлагаемое устройство, которое включает смесительные камеры 1, камеру сгорания 2, наглухо закрытую резиновой диафрагмой 3, и матрицу 4. Заготовку 5 размещают между диафрагмой и матрицей и зажимают болтами 6.

В 1956 г. В.И. Еремин и Ю.С. Навагин предложили способ листовой штамповки (вытяжки) с помощью взрыва заряда взрывчатого вещества. Для реализации данного способа контейнер 1 (рис. 2) с зарядом 2 устанавливают на заготовке 4 и заполняют рабочей жидкостью (водой 3). В качестве уплотнителя 5 может быть применен обычный резиновый шнур. Возможно применение матрицы 6 как цельной, так и комбинированной.

Целью работы является определение преимуществ импульсных методов обработки металлов давлением по сравнению с традиционными методами ОМД.

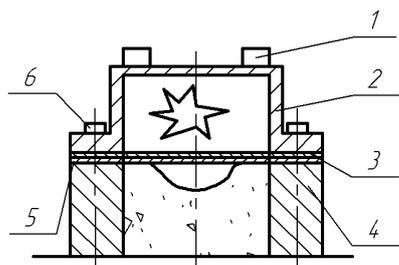


Рис. 1. Устройство для штамповки взрывом

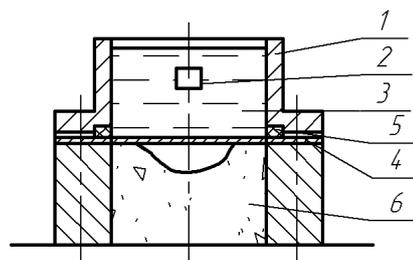


Рис. 2. Штамповка БВВ в воде

Процесс взрывной штамповки можно классифицировать, проанализировав четыре основных его элемента: энергоноситель (заряд ВВ) - передающая среда - заготовка - матрица.

Процесс штамповки взрывом состоит из следующих стадий: взрыв ВВ, нагружение заготовки, скоростное ее деформирование, многократное ударное нагружение оснастки.

Передающие среды должны обеспечивать легкую доступность и максимальную упрощенность подготовки к ведению процесса и возможность повторного их использования. В качестве передающей среды чаще всего применяется вода.

Поскольку плотность воды превышает плотность воздуха более чем в 700 раз, при взрыве под водой практически исключается возможность разброса осколков, что позволяет значительно повысить безопасность работы.

Взрыв – процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени.

При взрыве в окружающей среде образуется и распространяется ударная волна.

Ударная волна – тонкая переходная область, движущаяся в веществе (газе, жидкости или твердом теле) и характеризующая скачкообразное увеличение давления, изменение плотности, температуры и скорости движения вещества. Ударная волна движется в направлении несжатого вещества со скоростью, превышающей скорость звука в нем.

В теории взрыва под ударной волной понимают всю массу среды, сжатую и приведенную в движение, а движущуюся поверхность между сжатой и невозмущенной средой называют *фронтом ударной волны*.

Для определения основных характеристик ударной волны рассмотрим распространение взрыва в неограниченном объеме жидкости. Первым этапом развития взрыва является детонация заряда ВВ. При выходе фронта детонационной волны на поверхность раздела заряд - жидкость по продуктам взрыва начинает распространяться волна нагрузки, которая, проникая в зону химической реакции, тормозит процесс разложения ВВ.

Масса детонирующей части сферического заряда

$$G_a = Gk, \quad (1)$$

где G – общая масса заряда, кг.

Коэффициент полноты взрыва в воздухе

$$k = \frac{G_a}{G} = \left(1 - \frac{d_{\dot{e}}}{2r_0}\right)^3, \quad (2)$$

где d_k и r_0 – критический диаметр и радиус заряда ВВ, м.

Критическим называется диаметр заряда ВВ, при котором распространение детонации по заряду теряет свой устойчивый характер. Критический диаметр d_k конкретного заряда ВВ зависит от среды, окружающей заряд. Например, при взрыве в воздухе тротила его $d_k = 6 \times 10^{-3}$ м. При взрыве в воде он значительно уменьшается.

С увеличением диаметра заряда выше критического скорость детонации повышается, достигая своего максимального значения при некотором предельном диаметре d_{np} , а затем стабилизируется. При взрыве в воздухе d_{np} литого тротила составляет 3×10^{-2} м, прессованного – 10^{-2} м.

При взрыве тротила в воде:

$$k = \left(1 - \frac{d_k}{6r_0}\right)^3, \quad (3)$$

$$r_0 = 5,35 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{G}. \quad (4)$$

Давление на фронте детонационной волны

$$P_{Д} = \frac{C_{Д}^2 \rho_{ВВ} (\rho_{П.В} - \rho_{ВВ})}{\rho_{П.В}}, \quad (5)$$

где C_D – скорость детонации; $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ; $\rho_{П.В}$ – плотность продуктов взрыва.

Например, при детонации тротила ($C_D=7200$ м/с и $\rho_{ВВ} = 1600$ кг/м³) плотность продуктов взрыва $\rho_{П.В} = 2130$ кг/м³, а давление на фронте детонационной волны 2×10^4 МПа.

Скорость потока продуктов взрыва определяется равенством

$$U = C_D \frac{(\rho_{П.В} - \rho_{ВВ})}{\rho_{П.В}} \quad (6)$$

и составляет 1800 м/с, т.е. 1/4 скорости детонации.

При выходе детонационной волны на границу среды исходная система распадается с образованием поверхностей сильного разрыва: газового пузыря и фронта ударной волны.

В области, ограниченной этими поверхностями, реализуются поля давлений и скоростей частиц жидкости. В начальный период взрыва для фронта ударной волны характерна высокая скорость распространения, обусловленная давлением на фронте детонационной волны. Вблизи заряда эти скорости превышают, а скорость распространения стремится к скорости звука в воде ($C = 1500$ м/с). Объем продуктов взрыва расширяется, а давление в нем быстро падает.

Когда ударная волна проходит расстояние, равное десяти радиусам заряда, радиус газового пузыря увеличивается примерно в три, а объем продуктов взрыва – в 30 раз.

Основной характеристикой ударной волны является ее давление. При взрыве сферического заряда давление на фронте ударной волны ($\bar{\ell} = \ell_\phi / \ell_0 \geq 12$) описывается почти акустической зависимостью.

$$P_{\max} = A_\kappa \left(\frac{G^{1/3}}{\ell_\phi} \right)^\alpha \quad (7)$$

где A_κ , α – коэффициенты, зависящие от свойств ВВ и передающей среды; ℓ_ϕ – расстояние от центра взрыва до фронта ударной волны.

Например, для тротила при $12 < \ell_\phi < 240$

$$P_{\max} = 533 \left(\frac{G^{1/3}}{\ell_\phi} \right)^{1,13} \quad (8)$$

За фронтом ударной волны

$$P = P_{\max} e^{-t/\theta} \quad (9)$$

где t – время, отсчитываемое от момента прихода фронта ударной волны в данную точку жидкости до момента фиксации.

Характерное время, определяющее интенсивность падения давления в данной точке с течением времени, можно определить из эмпирического соотношения

$$\theta = 10^{-3} a \left(\frac{\ell_\phi}{G^{1/3}} \right)^n G^{1/3} \quad (10)$$

Для тротила $a = 0,1$; $n = 0,24$. Тогда при $\bar{\ell}_\phi = 100$

$$\theta = \frac{2,5 \ell_0}{C} \quad (11)$$

Для практического использования выражения (8) и (10) могут быть представлены в следующем виде:

$$P_{\max} = 530 \times 10^4 \left(\frac{G^{1/3}}{\ell_\phi} \right)^{1,09}; \quad (12)$$

$$\theta = 0,07 \times 10^{-3} G^{1/3} \left(\frac{\ell_\phi}{G^{1/3}} \right)^{0,17} \quad (13)$$

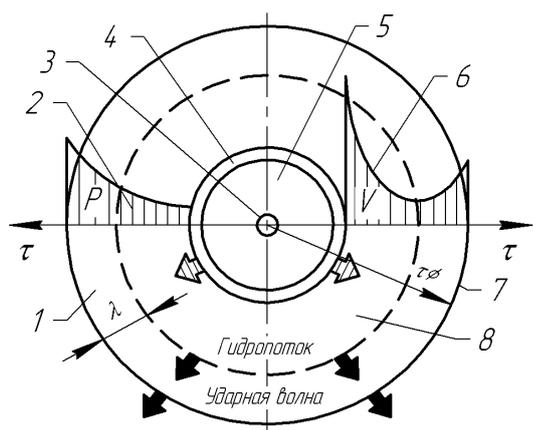


Рис. 3. Распределение скоростей и давлений при взрыве в неограниченном объеме жидкости:
 1 – зона ударной волны; 2 – распространение давления по радиусу; 3 – заряд; 4 – граница пузыря продуктов взрыва; 5 – продукты взрыва; 6 – распределение скорости движения жидкости по радиусу; 7 – граница ударной волны; 8 – зона гидротока

Важной характеристикой взрыва является распределение массовых скоростей жидкости $U(\ell, t)$ в области между границей газового пузыря и фронтом ударной волны. Характер распределений массовых скоростей жидкости и давлений при взрыве в неограниченном объеме жидкости показана на рис. 3.

Для сферической ударной волны на границе фронта скорость может быть вычислена по формуле

$$U \cong \frac{P}{(\rho_0 C)}, \quad (14)$$

где ρ_0 – начальная плотность воды.

Это соотношение достаточно точно выполняется в интервале

$$l_{\phi} - \lambda \leq l \leq l_{\phi} (\lambda \cong 20C), \quad (15)$$

где U – скорость жидкости на границе газового пузыря.

Механизм воздействия ударной волны и гидротока на заготовку подробно освещен в технической литературе [1]. Последовательность нагружения заготовки показана на рис. 4. При взрыве заряда 1 создается ударная волна 2 и газовый пузырь 3.

В момент падения ударной волны на заготовку 4 последняя начинает движение, при котором вовнутрь жидкости распространяется отраженная волна сжатия 5.

В результате смещения заготовки давление в волне сжатия быстро падает, а в окрестности заготовки образуется область кавитирующей жидкости 6, частицы которой двигаются вместе с заготовкой. При выходе отраженной волны сжатия на границу пузыря продуктов взрыва 3 возможно возникновение первой дополнительной зоны кавитации 7. Заготовка, освободившись от

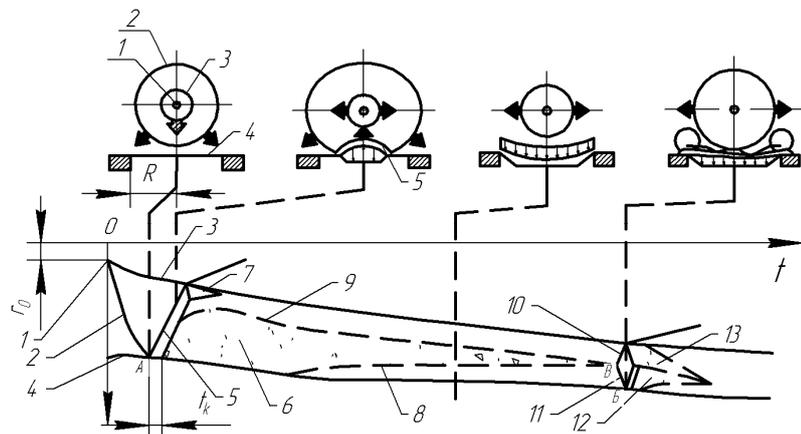


Рис. 4. Схема нагружения заготовки при штамповке взрывом

воздействия ударной волны, начинает тормозиться и тогда на нее оседают частицы жидкости из кавитационной области, которая уплотняется по ее нижнему фронту 8. Газовый пузырь сдвигает верхнюю границу кавитации 9 в сторону заготовки. В точке В происходит захлопывание зоны кавитации, сопровождающееся резким повышением давления и распространением дополнительных волн сжатия 10 и 11. В этот момент возможно возникновение областей кавитации 12 и 13.

Применение взрывчатых веществ не всегда возможно в действующем производстве. В этом случае используют другие импульсные способы, например, электрогидравлический эффект.

Электрогидравлический эффект – промышленный способ преобразования электрической энергии в механическую, совершающийся без посредства промежуточных механических звеньев, с высоким КПД. Сущность этого способа состоит в том, что при осуществлении внутри объема жидкости, находящейся в открытом или закрытом сосуде, специально сформированного импульсного электрического (искрового, кистевого и других форм) заряда вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу и сопровождающиеся комплексом физических и химических явлений.

Осуществление электрогидравлического эффекта связано с относительно медленным накоплением энергии в источнике питания и практически мгновенным ее выделением в жидкой среде. Основными действующими факторами электрогидравлического эффекта являются высокие и сверхвысокие импульсные гидравлические давления, приводящие к появлению ударных волн со звуковой и сверхзвуковой скоростями; значительные импульсные перемещения объемов жидкости, совершающиеся со скоростями, достигающими сотен метров в секунду; мощные импульсно возникающие кавитационные процессы, способные охватить относительно большие объемы жидкости, инфра- и ультразвуковые излучения; механические резонансные явления с амплитудами, позволяющими осуществить взаимное отслаивание друг от друга многокомпонентных твердых тел; мощные электромагнитные поля (десятки тысяч эрстед); интенсивные импульсные световые, тепловые, ультрафиолетовые, а также рентгеновские излучения; импульсные гамма- и (при очень больших энергиях импульса) нейтронное излучения; многократная ионизация соединений и элементов, содержащихся в жидкости.

Все эти факторы позволяют оказывать на жидкость и объекты, помещенные в нее, весьма разнообразные физические и химические воздействия. Так ударные перемещения жидкости, возникающие при развитии и схлопывании кавитационных полостей, способны разрушать неметаллические материалы и вызывать пластические деформации металлических объектов, помещенных вблизи зоны разряда. Мощные инфра- и ультразвуковые колебания, сопровождающие электрогидравлический эффект, дополнительно диспергируют уже измельченные материалы, вызывают резонансное разрушение крупных объектов на отдельные кристаллические частицы, осуществляют интенсивные химические процессы синтеза, полимеризации, обрыва

сорбционных и химических связей. Электромагнитные поля разряда также оказывают мощное влияние, как на сам разряд, так и на ионные процессы, протекающие в окружающей его жидкости. Под их влиянием могут происходить разнообразные физические и химические изменения в обрабатываемом материале.

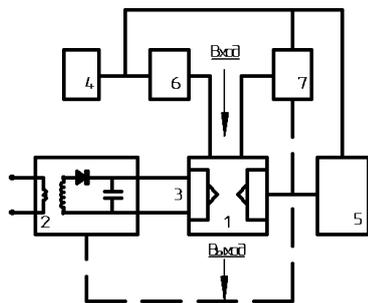


Рис. 5. Блок-схема силовой импульсной системы с использованием электрического взрыва

применяются гидроустановки мощностью 8 – 80 кВт, которые обеспечивают давление истечения струи 150-1000 МПа и выше, что соответствует скорости струи 540-1400 м/с и намного превышает скорость звука в воздухе.

В зависимости от толщины обрабатываемого материала и его физико-механических свойств диаметр выходного отверстия сопла выбирают в пределах 0,05-0,5 мм, при этом расход жидкости, проходящей через это сопло, составляет $500 - 2500 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Режущие возможности струи зависят от ряда факторов, в том числе от состава рабочей жидкости, способа воздействия на обрабатываемый материал и направления струи рабочей жидкости по отношению к обрабатываемой поверхности. Для резки стальных листов необходимо давление 700-1000 МПа, а при использовании абразивно-жидкостной струи давление можно снизить до 250 МПа.

Повысить производительность процесса гидрорезания можно за счет создания «вибрирующей струи» путем импульсного воздействия на струю внутри сопла, используя для этих целей, например, высоковольтный импульсный разряд в жидкости - электрогидравлический эффект. Способ обработки поверхности пульсирующей средой, когда пульсацию струи получают с помощью производимых в сопле высоковольтных электрических разрядов с энергией импульса 50-200 Дж и с частотой следования электрических разрядов 20-50 Гц, применяют для очистки рабочей поверхности шлифовального инструмента.

Конструктивные схемы резки листовых материалов струей жидкости показаны на рис. 6., где 1 – система управления; 2 – система низкого давления; 3 – гидропреобразователь (мультипликатор, насос); 4 – сопло; 5 – обрабатываемый материал; 6 – рабочий стол; 7 – сливной бак; 8 – система очистки; 9 – подпитывающая система; 10 – система подготовки абразивной суспензии; 11 – насадка; 12 – зарядное устройство; 13 – конденсаторная батарея; 14 – разрядное устройство [2].

Конструктивная схема (рис. 6, а) демонстрирует обычную резку струей жидкости постоянного сверхвысокого давления, а конструктивная схема (рис. 6, б) используется для осуществления абразивно-жидкостной резки. Схема (рис. 6, в) дает представление о резке пульсирующей струей с использованием электрогидравлического эффекта.

При ударе струи жидкости о поверхность материала в центре удара происходит его сжатие, вызывающее в разрушаемом материале резкое повышение локального давления P продолжительность максимума которого (1 – 2 мкс) зависит от величины давления истечения струи, скорости удара, формы и размеров струи, а также от скорости волны сжатия [3-4].

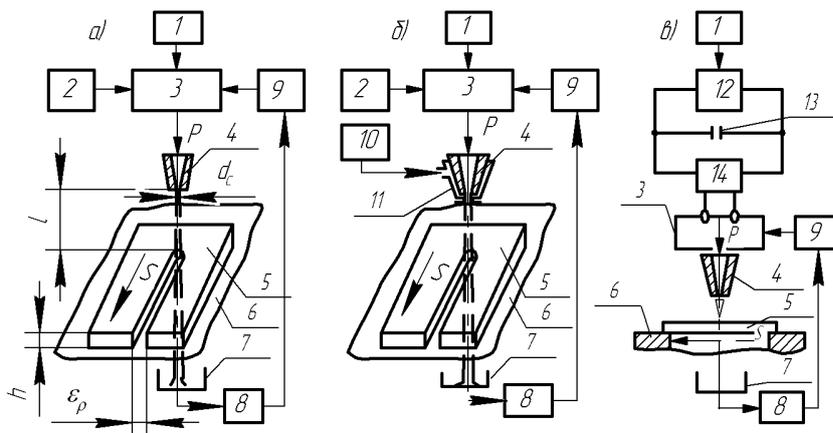


Рис. 6. Конструктивные схемы процесса гидрорезания

Институтом сварки в г. Кембридже (Великобритания) разработан метод гидроабразивной резки стали толщиной до 225 мм, заключающийся в использовании струи воды под сверхвысоким давлением с добавлением кремниевой крошки размером 0,4-1,4 мм.

Фирмой «Flow Systems» (США) разработана серия дешевых насосов-мультипликаторов с максимальным рабочим давлением 206850, 275800, 34475 кПа, а также режущий узел, который позволяет выполнить точную центровку струи. Разработаны также сопло с боковым вводом абразива и ловушка, позволяющие обрабатывать вертикальные поверхности в ограниченных пространствах.

На верфи ВМС США «Puget Sound Naval Shipyard» в Бремертоне применили установку фирмы «Flow Systems», в состав которой входят насос модели 151 с усилителем давления (206 МПа) и 4,5-килограммовый резак. Резка производится в любых направлениях с погрешностью $\pm 0,4$ мм.

Выводы

Импульсные методы обработки металлов давлением по сравнению с традиционными методами ОМД имеют ряд преимуществ:

- сокращение сроков технологической подготовки производства;
- применение упрощенной оснастки;
- универсальность технологического оборудования и т.д.

Особенно это все важно для мелкосерийного производства.

Поведение металла при импульсных методах нагружения еще изучено недостаточно полно, а здесь заложены дополнительные резервы повышения эффективности этих методов.

***Анотація.** В роботі розглянуті імпульсні методи обробки металів тиском, які в порівнянні з традиційними методами ОМТ мають ряд переваг. Так імпульсні методи обробки дозволяють значно скоротити терміни технологічної підготовки виробництва. Крім того, їх застосування передбачає використання спрощеного оснащення та універсального технологічного обладнання. Всі ці переваги дуже важливі для дрібносерійного виробництва. Процес електрогідрравлічного штампування можна виконувати у звичайних цехових умовах. Можливо виконати забезпечення питань техніки безпеки. Легко забезпечити точне регулювання енергії та багатократний вплив на заготовку з однієї установки. До теперішнього часу поведінка металу при імпульсних методах навантаження недостатньо повно вивчена. Тому є велика ймовірність визначення додаткових резервів підвищення ефективності цих методів.*

***Ключові слова:** імпульсні методи, обробка металів тиском, технологічне обладнання, дрібносерійне виробництво, високошвидкісні методи обробки, штампування вибухом, вибухова речовина, вибухова хвиля, енергоносії, фронт ударної хвилі, швидкість детонації*

***Abstract.** The paper discusses the pulse methods of metal forming. Pulsed methods metal forming compared to conventional OMD techniques have several advantages. Pulse processing can significantly reduce the time of technological preparation of production. Moreover, their use requires the use of simplified tooling and universal processing equipment. All these advantages are very important for small-scale production. The process of electro hydraulic stamping can be done in the shop floor. Perhaps a simple solution to safety issues. It is easy to provide accurate power control, and repeated exposure to the workpiece with a single installation. So far, the behavior of metal under impulse loading methods is poorly understood. Therefore, there is a possibility to extract additional reserves for increasing the effectiveness of these methods.*

***Keywords:** pulse methods, metal forming, process equipment, small-scale production, high-speed processing methods, explosive stamping, explosive, blast wave, energy source, the shock front, detonation velocity*

Библиографический список использованной литературы

1. *Тітов В.А.* Високошвидкісні методи обробки металів тиском: підруч. / В.А. Тітов, Ю.С. Шамарін, А.І. Долматов та ін.; під ред. В.А. Тітова. — Київ, КВІЦ, 2010. — 304с.
2. *Жумькин А.П.* Утилизация судов и кораблей / А.П. Жумькин, Ю.Е. Шамарин. — Киев, НИИФПП, 1997. — 108с.
3. *Шамарин Ю.Е.* Электрогидравлический процесс формообразования металлов / Ю.Е. Шамарин, В.Н. Чачин, Ю.Е. Шарин. — К.: УкрНИИТИ, 1971. — 23с.
4. *А.С.158065* в СССР, МКИ В21D26/12. Устройство для электрогидравлической штамповки / С.П. Мартюк, Ю.Е. Шамарин, Т.К. Стеценко, И.Г. Антиханович (СССР) №4621767/25-27, заявл. 19.12.88. Зарегистрирован в Госреестре 22.03.90. — 3с.

References

1. *Titov V.A., Shamarin Ju.E., Dolmatov A.I.* та in. Visokoshvidkisini metodi obrobki metaliv tiskom: pidruch. (High-speed methods of metal forming) pid red. V.A. Titova. Kiev, KVIC, 2010. 304p.
2. *Zhummykin A.P., Shamarin Ju.E.* Utilizacija sudov i korablej (Recycling of ships and vessels). Kiev, NIIFPP, 1997. 108p.
3. *Shamarin Ju.E.* Elektrogidravlicheskiy process formoobrazovanija metallov Ju.E. Shamarin, V.N. Chachin, Ju.E. Sharin. K.: UkrNIINTI, 1971. 23p.
4. *A.S.158065* v SSSR, MKI V21D26/12. Ustrojstvo dlja jelektrogidravlicheskoj shtampovki S.P. Martjuk, Ju.E. Shamarin, T.K. Stecenko, I.G. Antihanovich (SSSR) №4621767/25-27, zajavl. 19.12.88. zaregistririvan v Gosreestre 22.03.90. 3p.