

УДК 621.97.01

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-77-87

Комплексная оценка критичности в виде ударной волны при штамповке взрывом

В. Ф. Уразбахтин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Воткинский филиал, Воткинск, Россия

В статье рассматривается возможность количественной оценки ударной волны, возникающей при взрыве заряда бризантного взрывчатого вещества. Оценивать предлагается множеством показателей, характеризующих наступление критичности. Показатели критичности являются оценками выполнения функций технологической системы штамповки. Критичность наступает, если хотя бы значение одного показателя работы системы не будет соответствовать установленному диапазону. Показано, что развитие критичности приводит к нерасчетному режиму движения ударной волны.

К ударной волне, возникающей после взрыва заряда бризантного взрывчатого вещества, в процессе штамповки предъявляются специальные требования. Соблюдение требований в ходе пластического деформирования заготовки приведет к получению качественных крупногабаритных деталей ракетной техники. Несоблюдение требований принимается за критичность.

Ударная волна необходима для выполнения главной функции системы штамповки: силового механического воздействия и пластического деформирования заготовки. Осуществление этой функции ударной волны достигается в результате вспомогательных функций, например, движения гидравлического потока в зоне штамповки и газового пузыря, образованного при взрыве заряда. Выполнение каждой функции оценивается своим показателем критичности. Показатели объединены в математическую модель.

В статье представлено 16 показателей критичности. С помощью математической модели осуществляется вычисление комплексной оценки. Оценка указывает степень близости наступления нерасчетного режима действия ударной волны при штамповке взрывом крупногабаритных деталей ракеты.

Ключевые слова: ударная волна, бризантное взрывчатое вещество, штамповка взрывом, критичности, сложная система, главная функция, вспомогательная функция, параметры, показатели критичности, гидропоток, газовый пузырь, продукты взрыва.

Введение

В многоступенчатых ракетах находятся крупногабаритные детали сложной конфигурации, изготовленные из труднообрабатываемых специальных металлических сплавов. К этим деталям относятся корпуса отсеков, днища баков в ракетах с двигательной установкой на жидком топливе. В ходе их производства необходимо обеспечить полное соблюдение технических требований, а также использовать специальное дорогостоящее технологическое оборудование и оснастку.

С экономической точки зрения наиболее подходящим способом изготовления таких деталей является листовая штамповка. Однако используемое при этом оборудование и оснастка отличается значительными габаритными размерами, сложностью и используемыми мощностями, что делает процесс создания поковок для деталей в условиях мелкосерийного или опытного производства экономически нецелесообразным.

Обычно поковки для крупногабаритных деталей ракетной и авиационной техники изготов-

ливают штамповкой взрывом (рис. 1). Она относится к высокоскоростным способам обработки металлов давлением, отличается простотой используемой оснастки, минимальными затратами на создание необходимого усилия по сравнению с известными методами обработки, применяемыми в реальном производстве.

Источником энергии, необходимой для осуществления формоизменения заготовки является взрывное превращение заряда бризантного взрывчатого вещества (БВВ) [1, 2]. Передача этой энергии, используемой для совершения работы по пластическому деформированию, происходит с помощью ударной волны (УВ). Ее появление связано с высвобождением энергии при взрыве заряда БВВ и передачей окружающей среде – воде, которой заполнена внутренняя полость специального бассейна (рис. 1).

УВ за короткий отрезок времени приводит в движение частицы воды в бассейне, сопровождающееся резким изменением таких параметров, как давление, плотность, гидродинамическая скорость. От значений этих параметров УВ

зависит качество формообразования поковки деталей авиационной и ракетной техники [3, 4]. Отсюда возникает необходимость определения комплексной оценки состояния УВ, используемой в управлении процессом выполнения качественной штамповки взрывом в специальном бассейне.

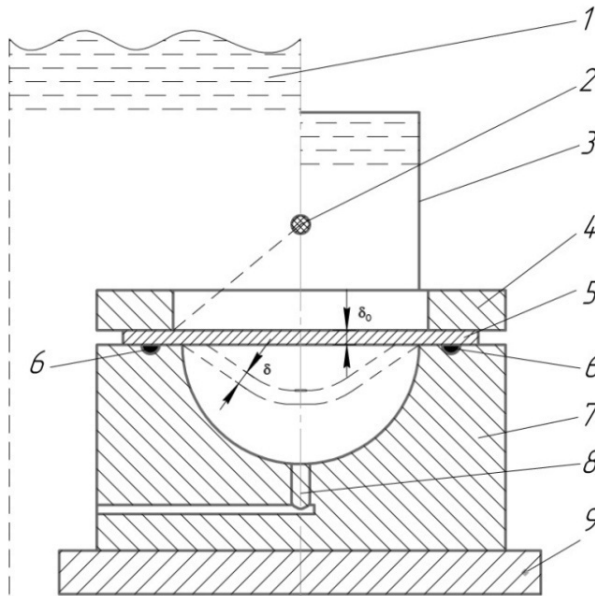


Рис. 1. Схема штамповки взрывом [1]: 1 – передающая среда; 2 – заряд БВВ; 3 – стенка бассейна; 4 – прижимное кольцо; 5 – заготовка; 6 – уплотнение; 7 – матрица; 8 – тракт вакуумирования рабочей полости матрицы; 9 – основание

Fig. 1. Scheme of stamping by explosion [1]: 1 - transmission medium; 2 - BVV charge; 3 - pool wall; 4 - clamping ring; 5 - blank; 6 - seal; 7 - matrix; 8 - evacuation path of the working cavity of the matrix; 9 - base

Теоретические положения

УВ при штамповке взрывом считается критичностью, в ходе развития которой заготовка превращается в поковку для готовой детали (рис. 2).

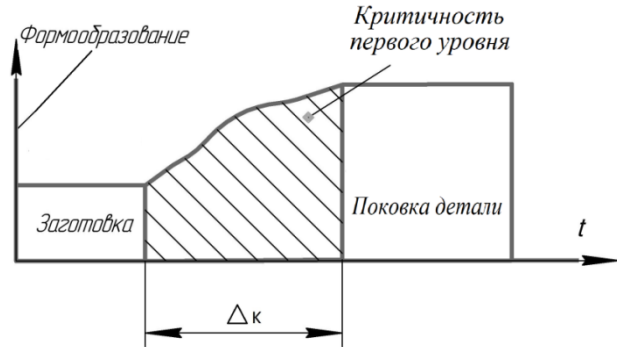


Рис. 2. Место критичности в процессе создания поковки готовой детали

Fig. 2. The place of criticality in the process of creating a forging of the finished part

Превращение происходит в течение конечного отрезка времени Δ_k , составляющего порядка нескольких десятков миллисекунд. В ходе развития этой критичности создается силовое воздействие, которым осуществляется пластическое деформирование заготовки.

Для исследования этой критичности УВ выделяется сложная техническая система (СТС), в которой происходит возникновение и перемещение силового воздействия, используемого для создания поковки готовой крупногабаритной детали [3, 4] (рис. 4).

Эта система обладает следующими признаками:

- целостностью и делимостью, состоящей в наличии в выделенной системе целого (т. е. УВ) и его составных частей (гидропоток и газовый пузырь);
- организованности, благодаря которой происходит целенаправленное преобразование поступившей в результате взрыва заряда БВВ энергии в другие виды: механическую, силовую и тепловую;
- наличием устойчивых связей между элементами, превосходящими по мощности связи с элементами окружающей среды.

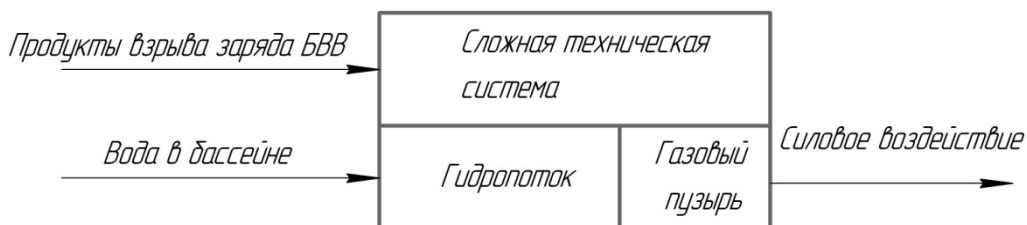


Рис. 3. Структура сложной технической системы – УВ

Fig. 3. The structure of a complex technical system – HC

Главной функцией S_0 СТС – УВ является создание силового воздействия, необходимого

для выполнения технологической операции пластического деформирования. Это воздейст-

вие создается в результате выполнения двух системных функций

$$S_0 \Rightarrow \{S_1; S_2\}. \quad (1)$$

Первая функция S_1 отражает движение гидротока внутри толщи воды бассейна и соприкосновение его с заготовкой, способной пластически деформироваться. Вторая функция S_2 определяет действия газового пузыря, возникшего при взрыве заряда БВВ. Продукты взрыва газового пузыря при контакте с заготовкой соз-

дают дополнительное механическое усилие, с помощью которого происходит пластическое деформирование заготовки.

Выполнение главной функции – S_0 связано с возникновением и развитием критичности верхнего, *первого уровня*. На этом уровне предполагается, что развитие критичности должно быть таким, что создаваемое усилие СТС при выполнении штамповки взрывом приводит к созданию поковки для качественной детали.

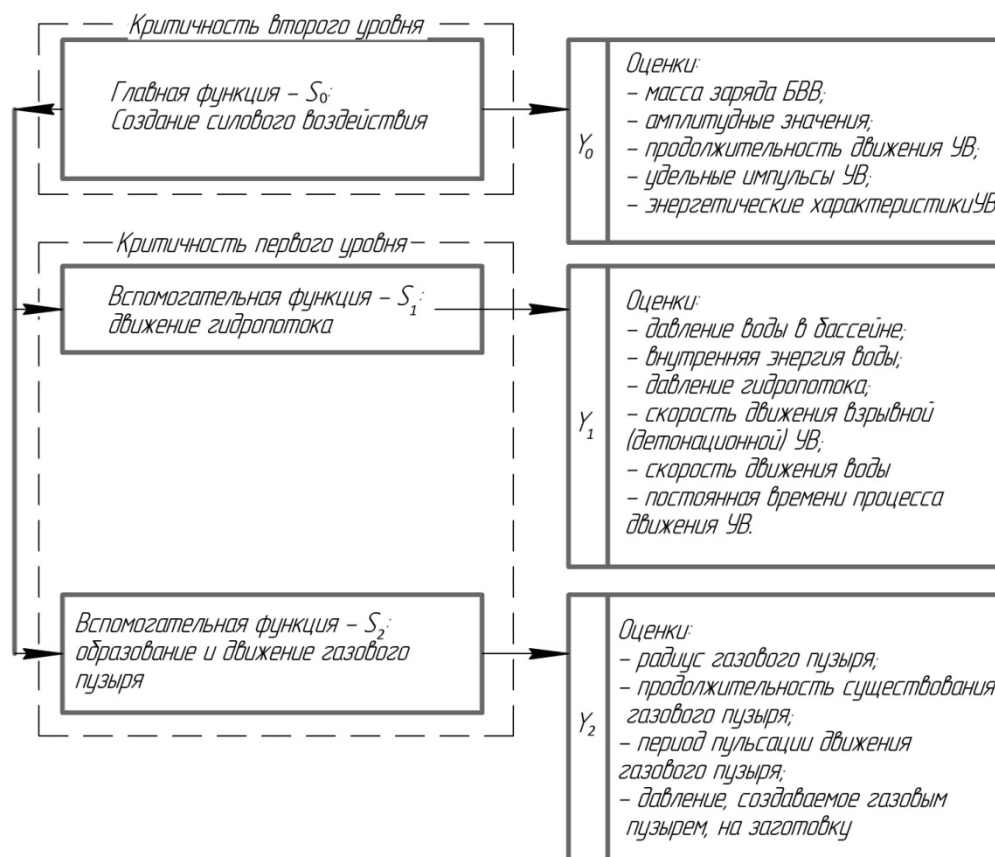


Рис. 4. Уровневая структура развития критичностей при штамповке взрывом

Fig. 4. Level structure of development of criticalities during forging by explosion

Выполнение вспомогательных функций S_1 и S_2 сопровождается критичностями *второго уровня*. Их развитие направлено на достижение предельных значений характеристик гидротока и газового пузыря. Вполне допустимо, что развитие критичности может привести к получению нерасчетных значений этих характеристик.

Для оценки критичностей первого и второго уровней вводятся специальные конечные множества (рис. 4).

$$S_i \Rightarrow Y_i, (i = 0, 1, 2). \quad (2)$$

Составляющими множества S_0 определяют критичности первого уровня. Они характеризуют выполнение главной функции СТС – УВ. Ими являются оценки массы заряда БВВ, который подрывается в толще воды внутри бассейна; амплитудных значений создаваемых давлений в результате подрыва заряда; продолжительностей движения УВ; удельных импульсов и энергетических характеристик УВ.

Критичности второго уровня связаны с работой вспомогательных функций – гидротока (S_1) и газового пузыря (S_2). Для их описания созданы отдельные конечные множества, соот-

ветственно Y_1 и Y_2 . В множестве Y_1 находятся следующие оценки: давление воды в бассейне, где выполняется штамповка взрывом; внутренняя энергия воды, в которой осуществлен подрыв заряда БВВ; давление гидротока; детонационная скорость движения УВ; скорость движения воды в местах соприкосновения фронта УВ с поверхностью заготовки; постоянная времени процесса в функции давления, создаваемого УВ.

Множество оценок критичности второго уровня Y_2 характеризуют возникший газовый пузырь при выполнении штамповки взрывом. Его составляющими являются оценки: радиуса пузыря, возникшего при взрыве заряда БВВ; продолжительностей его существования в первых трех УВ; периодов пульсации при движении; создаваемого давления в местах соприкосновения с поверхностью заготовки.

Перечисленные оценки предоставляются в виде специально разработанных показателей критичности $y_{i,j}$ ($i = 0, 1, 2$), которые зависят от параметров рассматриваемой СТС, составляющих конечное множество

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (3)$$

Элементы множества x_i в (3) имеют различное физическое содержание. Их значения определяются экспериментально, аналитически либо эмпирическими методами.

Введенные оценки выполнения функций S_0 , S_1 , S_2 СТС характеризуют процессы, происходящие в УВ. Они позволяют ввести понятие «структура» функционирования СТС – УВ:

$$Z(t) = \{z_{i,j}(t), i = 0, 1, 2; j = 1 \dots, k_i\}, \quad (4)$$

как совокупности оценок, определяющих качество УВ. В качестве таких оценок приняты показатели критичности $y_{i,j}$.

В каждый текущий момент времени t_i оценки в (4) принимают значения, определяющие состояние СТС – УВ:

$$C_k = \{t_k; z_{i,j}(t_k), i = 0, 1, 2; j = 1, k_i; t_k \in 0, \Delta_k\}, \quad (5)$$

где Δ_k – длительность существования УВ.

При таком допущении процесс функционирования СТС – УВ представляется в виде последовательной смены состояний C_k (рис. 5).

Анализ состояний СТС – C_k позволяет их разделить на две группы.

Первая группа определяет рабочие состояния, при которых характеристики движения и мощности УВ соответствуют всем техническим требованиям по созданию заданного усилия в местах контакта УВ с заготовкой. В этих состояниях УВ, как СТС, *удовлетворяет* всем регламентным требованиям, в том числе по эксплуатации бассейна и работе заряда БВВ. Такое состояние будем считать **расчетным**.

Во второй группе располагаются состояния, для которых значение хотя бы одного показателя критичности $y_{i,j}$ не находится в установленном диапазоне $(y_{i,j})^{\min} \dots (y_{i,j})^{\max}$. Это означает, что состояние УВ в целом *не удовлетворяет* регламентным требованиям к заряду БВВ, либо к воде бассейна, либо не будет создано необходимое усилие для успешного получения поковки готовой детали с требуемым качеством. Такое состояние называется **нерасчетным**.

Наибольший интерес представляют состояния СТС – УВ, которые находятся в переходе от расчетного к нерасчетным состояниям. Эти переходы сопровождаются возникновением критичностей первого и второго уровней, направляемое развитие которых, как правило, приводит к неудовлетворительным результатам при штамповке взрывом.

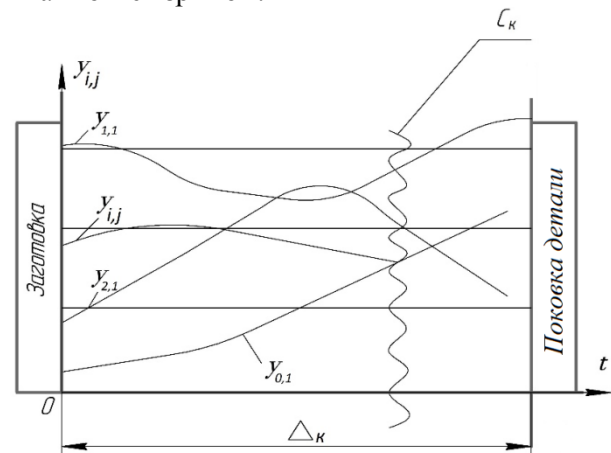


Рис. 5. Схема процесса функционирования СТС – УВ

Fig. 5. Scheme of the process of functioning of the STS - HC

Для выявления этих ситуаций необходимо создание специальной математической модели, которая состоит из оценок, характеризующих выполнение функций S_0 , S_1 и S_2 .

Построение математической модели

В данной модели учитывается поведение СТС с помощью комплекса оценок, в качестве которых выступают показатели критичности УВ – $y_{i,j}$.

Комплексная оценка СТС – УВ определяется всеми показателями критичности $y_{i,j}$:

$$S_0, S_1, S_2 \Leftrightarrow Y_0(\{y_{0,j}\}), Y_1(\{y_{1,j}\}), Y_2(\{y_{2,j}\}). \quad (6)$$

Предполагая, что все оценки в СТС являются равнозначными. Тогда комплексная оценка представляется в виде

$$J = J_0 + J_1 + J_2, \quad (7)$$

где

$$(S_0, Y_0) \Rightarrow J_0 = \sum_{j=1}^5 y_{0,j}; \quad (S_1, Y_1) \Rightarrow J_1 = \sum_{j=1}^6 y_{1,j}; \\ (S_2, Y_2) \Rightarrow J_2 = \sum_{j=1}^3 y_{2,j}; \quad (8)$$

J_0 – оценка критичности первого уровня выполнения главной функции S_0 ; J_1, J_2 – оценки критичностей выполнения второго уровня вспомогательных функциях S_1, S_2 – гидротока воды бассейна и газового пузыря из продуктов взрыва заряда БВВ.

При создании показателей критичности $y_{i,j}$ принимаются допущения, аналогично принятым в [5].

1. Развитие критичности УВ оценивается по степени соответствия ограничениям, накладываемым на значения оценок, характеризующих выполнение главной и вспомогательных функций СТС. Эти ограничения вытекают из требований, предъявляемых к штамповке взрывом и к конкретной поковке для детали.

2. Каждый показатель критичности $y_{i,j}$ оценивает степень приближения соответствующей оценки в установленном диапазоне изменения.

3. Показатели критичности $y_{i,j}$ в создаваемой математической модели являются безразмерными. Они отнормированы так, что значение, равное 0,5, является наилучшим и соответствует случаю отсутствия нерасчетной критичности. Наихудшее значение показателя критичности $y_{i,j}$ соответствует величине – 1,0. Этот случай означает возникновение нерасчетного состояния СТС, развитие которого приведет однозначно к неприемлемым последствиям.

4. Показатели критичности в математической модели представлены в безразмерной форме

$$y_{i,j} = \begin{cases} 0,5, \text{ если } G_{i,j} \leq 0,5, \\ 1, \text{ если } G_{i,j} \geq 1,0, \\ G_{i,j} \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (9)$$

где $G_{i,j}$ – оценка критичности при выполнении i -й функции СТС j -го условия в безразмерном представлении.

5. В случае функционирования СТС – УВ в рабочем (расчетном) состоянии при выполнении функций S_0, S_1 и S_2 показатели критичности находятся в установленном диапазоне.

Рассмотрим выражения оценок $G_{i,j}$ в главной и вспомогательных функциях S_0, S_1 и S_2 , характеризующих состояния УВ.

Множество оценок Y_0 (главная функция – S_0). В состав множества входит пять показателей критичности

$$J_0 = \sum_{j=1}^5 y_{0,j}.$$

1. *Масса заряда БВВ* является источником возникновения УВ в штамповке взрывом. В такой штамповке обычно используются точечные заряды, которые создают сферическую УВ с мощностью пропорциональной массе – m_{BB} . В безразмерном виде эта оценка является функцией параметров, входящих в множество (3):

$$G_{0,1} = f_{1,1}(m_{BB}^H, \varepsilon_m, m_{BB}, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}), \quad (10)$$

где m_{BB}^H, ε_m – нормативное значение и допуск на изменение массы заряда БВВ; x_{10} – расстояние от центра заряда до центра масс штампуемой поковки для детали; x_{11}, x_{12} – начальная плотность воды в бассейне и плотность материала заготовки; x_{13} – высота поковки для готовой детали, x_{14} – толщина заготовки, x_{15}, x_{16} – константы материала заготовки в законе изменения предела прочности $\sigma_{зар} = x_{16} \text{Exp}(x_{15})$.

На основе данных БВВ функции (10) определяется выражением

$$G_{0,1} = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_m^2} [m_{BB}^2 - 2m_{BB} \cdot m_{BB}^4 + 2(m_{BB}^H)^2],$$

где $m_{BB} = \left(\frac{\omega x_{14} x_{10}^{1,8}}{1 - \mu^2} N \right)^{0,8}$ – масса заряда БВВ

[2,6]; $\omega = \frac{\omega_{CP}}{\pi \cdot x_{10}^2}$ – удельная работа, совершенная

при деформации заготовки; $(1 - \mu^2) = 0,813$ – для тонкостенных изделий с $\beta > 2$; $\beta = \frac{c_0 \theta}{x_{12} \cdot x_{14}}$;

$N = 1,376 \cdot 10^{-6}$; $\omega_{CP} = \frac{x_{16}}{1 + x_{15}} \left(\frac{4 x_{13}^2}{3 x_{10}} \right)^{1+x_{15}} \pi x_{10}^2 x_{14}$;

$$\theta = A_{BB} \left[\frac{\sqrt[3]{m_{BB}}}{x_{10}} \right]^{\alpha_{BB}} \sqrt[3]{m_{BB}} - \text{постоянная времени}$$

в экспоненциальном законе спада давления УВ (для БВВ в виде тротила: $A_{BB} = 0,0588$; $\alpha_{BB} = 0,89$).

2. Амплитудные значения усилий в виде давлений, приложенных к заготовке при взрыве заряда БВВ.

Нагрузка для деформирования заготовки в виде давления и разгрузки создается УВ, а также гидропотокотом и газовым пузырем. Пузырь возникает при расширении продуктов взрыва заряда БВВ. Наибольшие давления приходятся на первые три волны. По данным в [7] на них приходится 93 % всей энергии (60 % – на первую, 25 % на вторую и 8 % на третью УВ).

В безразмерном виде эта оценка выполнения главной функции – S_0 СТС имеет вид

$$G_{0,2} = \max \{G_{2,1,i}, i = 1, 2, 3\}, \quad (11)$$

где $G_{0,2,i} = f_{0,2,i}(p_{im}^{\min}, p_{im}^{\max}, p_{im})$ – оценка амплитудной силовой нагрузки в виде давления после взрыва заряда в воде бассейна при действии i -й волны; $p_{im}^{\max}, p_{im}^{\min}$ – максимальные и минимальные значения амплитудных значений давления в i -й ударной волне; $p_{im} = p_{ПВЗi} + p_K + p_{i2}$ – амплитудное значение давления, действующее на заготовку со стороны i -й УВ [8, 9];

$p_{ПВЗi} = 134 \cdot 10^5 (R_6 / R_{ПВЗi})^{3,75}$ – максимальное давление внутри газового пузыря из продуктов взрыва в момент подхода i -й УВ; $p_K = 405300$ Па – разрывная прочность УВ; $p_{i2} = 1,013 \cdot 10^5 \cdot g x_{11} (1 + 0,13 \cdot x_{23}) \cdot x_{17}$ – давление, создаваемое гидропотокотом при действии i -й УВ; $R_0 = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{m_{BB}}{x_{18}}$ – радиус заряда БВВ; x_{17} –

расстояние от центра заряда БВВ до поверхности заготовки, расположенной на дне бассейна; x_{18} – плотность БВВ, находящегося в заряде;

$R_{ПВЗi} = R_0 (1 + 2,42 c_0 t_i / R_0)^{0,4}$ – радиус газового пузыря из продуктов взрыва; $c_0 = \sqrt{n \cdot B \cdot x_{11} (1 + 0,1 \cdot x_{23})}$ – скорость звука в воде; g – ускорение свободного падения; n, B – параметры, которые можно взять в [8].

3. Движение УВ в водном пространстве бассейна в результате взрыва заряда БВВ сопровождается пульсациями. Пульсации оцениваются продолжительностями действия первых трех УВ.

В безразмерном виде эта оценка представляется в виде

$$G_{0,3} = \max \{G_{3,1,i}, i = 1, 2, 3\}, \quad (12)$$

где $G_{0,3,i} = f_{0,3,i}(t_i^{\max}, t_i^{\min}, t_i)$ – безразмерная оценка продолжительности прохождения i -й УВ; t_i^{\max}, t_i^{\min} – максимально и минимально допустимые продолжительности действия i -й УВ; $t_1 = 2 \cdot x_{17} / c_0$, $t_2 = 2 \cdot R_6 / C_0$, $t_3 = 4 \cdot R_6 / C_0$ – продолжительности действия первых трех УВ; R_6 – радиус бассейна [8].

4. В ходе взрыва в воде существенное значение для штамповки взрывом имеет удельный импульс. В математической модели эта оценка учитывает прохождение УВ при взрыве в воде. В безразмерной форме она представляется в виде

$$G_{0,4} = \max \{G_{4,1,i}, i = 1, 2, 3\}, \quad (13)$$

где $G_{0,4,i} = f_{0,4,i}(J_{уд,i}^{\max}, J_{уд,i}^{\min}, J_{уд,i})$ – безразмерная оценка амплитудного значения удельного импульса i -й УВ; $J_{уд,i}^{\max}, J_{уд,i}^{\min}$ – максимальное и минимальное значения амплитудных импульсов i -й УВ и передаваемые заготовке при взрыве заряда БВВ в воде.

Действительное значение удельного импульса для первых трех УВ определяются выражениями:

$$J_{уд1} = A_1; J_{уд2} = J_{уд1} - A_2; J_{уд3} = J_{уд2} - A_3,$$

где $A_i = 4\pi k_0 \int_0^{t_i} T_i(t) \cdot p_{i,m} dt$; k_0 – коэффициент, учитывающий принятое время затухания волны;

$$T_i(t) = \sqrt{c_0^2 t_i^2 - x_{10}^2} \left(c_0^2 \frac{t_i^3}{3} - x_{10} t_i \right) \cdot \theta_2 \cdot \sin(\alpha_2);$$

θ_2 – величина характерного времени затухания давления в УВ; α_2 – см. рис. 5.

5. Процесс штамповки взрывом является энергетическим процессом. Энергия, выделяющаяся при химическом превращении заряда БВВ, проходя через водную окружающую среду в виде УВ, достигает поверхности заготовки. Отсюда возникает необходимость введения энергетической оценки. В безразмерной форме она определяется функцией

$$G_{0,5} = f_{0,5,1}(E^{\min}, E^{\max}, E), \quad (14)$$

где E^{\max}, E^{\min} – предельные значения удельной энергоемкости УВ, которая используется при свершении процесса штамповки взрывом.

Действительное количество энергии, затраченное на штамповку, представляется в виде [1]

$$E = E_{\text{уб}} + E_{\text{ГП}},$$

где $E_{\text{уб}} = \sum_{i=1}^3 p_{im}^2 \cdot \theta \cdot \left[-\text{Exp} \left(-\frac{2t_1}{\theta} \right) \right] / (2 \cdot x_{11} \cdot c)$ – удельная энергия УВ;

$E_{\text{ГП}} = 0,36 \cdot E^{\text{мин}} \cdot \sum_{i=1}^3 \left(1 - \frac{R_{\text{пузыри}}}{R_i} \right)$ – энергия, затраченная на движение газового пузыря; $R_i = x_{17} - 0,1 \cdot \lambda$; λ – толщина зоны действия УВ.

Множество оценок Y_1 (вспомогательная функция – S_1). Вспомогательная функция S_1 , характеризующая движение гидротока, определяется 6 оценками

$$J_1 = \sum_{j=1}^6 y_{1,j}.$$

1. *Давление в бассейне воды, подвергнутой сжатию.* Оценка построена на реакции водяного слоя после разгрузки.

В безразмерной форме оценка является функцией

$$G_{1,1} = f_{1,1}(p_{\text{в}}^{\text{мин}}, p_{\text{в}}^{\text{макс}}, p_{\text{в}}), \quad (15)$$

где $p_{\text{в}}^{\text{мин}} = 5 \cdot 10^9$ Па, $p_{\text{в}}^{\text{макс}} = 7 \cdot 10^{10}$ Па – минимальное и максимальное значения давления пресной воды в бассейне, в пределах которых при разгрузке образуется смесь «жидкость – пар» [7].

Значение давления воды на участке сжатия УВ определяется выражением [12, 13]

$$p_{\text{в}} = p_0 \left[49,414 \cdot (\bar{\rho})^{20/3} - 32,62 \right] \cdot \left(1 + \frac{\bar{\rho} T}{A_s} \right); \quad \bar{\rho} = \frac{x_1}{\rho_0};$$

$$\bar{T} = \frac{x_{19}}{T_0}; \quad \rho_0 = 999,296 \text{ кг/м}^3;$$

$$A_s = 0,00548 (\bar{\rho})^{20/3} + 0,0799 \bar{\rho} + 0,0206;$$

$$T_0 = 288 \text{ K}; \quad p_0 = 607494 \text{ Па},$$

где x_{19} – температура воды в бассейне.

Например, эта безразмерная функция в математической модели определяется выражением

$$G_{1,1} = \frac{2}{(p_{\text{в}}^{\text{макс}} - p_{\text{в}}^{\text{мин}})^2} \times \\ \times [p_{\text{в}}^2 - p_{\text{в}}(p_{\text{в}}^{\text{макс}} + p_{\text{в}}^{\text{мин}}) + 0,5(p_{\text{в}}^{\text{макс}} + p_{\text{в}}^{\text{мин}})^2].$$

2. Вода, как среда для УВ, характеризуется таким термодинамическим параметром, как

собственная начальная (до взрыва) *внутренняя удельная энергия*. Построенная на основе этого параметра безразмерная оценка является функцией

$$G_{1,2} = f_{1,2}(E_{\text{в}}^{\text{макс}}, E_{\text{в}}^{\text{мин}}, E_{\text{в}}), \quad (16)$$

где $E_{\text{в}}^{\text{мин}}$, $E_{\text{в}}^{\text{макс}}$ – минимальное и максимальное значения удельной внутренней энергии воды в бассейне до момента выполнения штамповки взрывом.

Действительное значение внутренней энергии воды до взрыва заряда БВВ определяется выражением [12,13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{p_0}{\rho_0} \left[587,564 \cdot \bar{T} + (\bar{\rho})^{-1} \left(280,012 (\bar{\rho})^{20/3} + 32,6 \right) \right].$$

3. *После взрыва* вода в бассейне испытывает *давление*. Оценка этого параметра в математической модели построена с помощью ударной адиабаты, определенной эмпирическими формулами, представленными в [12, 13].

Безразмерная оценка представляется в виде функции

$$G_{1,3} = f_{1,3}(p_{\text{н}}^{\text{мин}}, p_{\text{н}}^{\text{макс}}, p_{\text{н}}), \quad (17)$$

где $p_{\text{н}}^{\text{мин}}$, $p_{\text{н}}^{\text{макс}}$ – предельные значения давления в воде после взрыва заряда БВВ; $p_{\text{н}}$ – действительное давление, возникающее в воде в результате подрыва заряда БВВ. Оно определяется выражением

$$p_{\text{н}} = [1 + e^{S-S_0}] \cdot [49,414 (\bar{\rho})^{20/3} - 32,62],$$

где $S = x_{20} / C_v$; $C_v = 3,3511 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / (\text{с}^2 \text{ k})$ – удельная теплоемкость воды при постоянном объеме; x_{20} – энтропия воды; S_0 – начальное значение энтропии воды.

4. Возникший в бассейне гидроток характеризуется *детонационной скоростью фронта УВ*. Безразмерная оценка на основе этой характеристики в математической модели представляется функцией

$$G_{1,4} = f_{1,4}(D_{\text{Ф}}^{\text{макс}}, D_{\text{Ф}}^{\text{мин}}, D_{\text{Ф}}), \quad (18)$$

где $D_{\text{Ф}}^{\text{макс}}$, $D_{\text{Ф}}^{\text{мин}}$ – предельные значения скорости движения детонационной УВ.

Действительная скорость движения детонационной УВ определяется выражением [5]

$$D_{\text{Ф}} = D_m - 3(x_{21} + x_{19}); \quad D_m = \frac{f_1 - 0,26}{0,25};$$

$$f_1 = 100 \frac{\Phi + \Psi}{m_{\text{ВВ}}};$$

$$\Phi = x_1 + x_2 - \frac{x_4 - x_5}{2x_1} + x_3; \quad \Psi = \frac{1}{3} - \frac{x_6}{1,75} - \frac{x_7}{4} - \frac{x_9}{5};$$

x_1, x_2, x_3, x_4 – количество атомов в молекуле соответственно кислорода, азота, фтора, водорода в БВВ; x_5, x_6 – количество молекул фтористого водорода и свободного кислорода, которые могут сформироваться при коэффициенте кислородного баланса $K_B > 1$; x_7, x_8 – количество атомов кислорода, присоединенных одинарной и двойной связью к углероду; x_9 – количество нитрогрупп, существующих в виде кислотных остатков; x_{18} – плотность БВВ, находящегося в заряде; x_{21} – критическая плотность БВВ.

5. Взрыв заряда БВВ в воде создает гидропоток, который сопровождается движением массы воды. В случае осуществления подрыва сферическим зарядом БВВ движение воды характеризуется *скоростью* – U_* . Безразмерная оценка, построенная на основе этой характеристики, представляется, является функцией:

$$G_{1,5} = f_{1,5}(U_*^{\max}, U_*^{\min}, U_*), \quad (19)$$

где U_*^{\min}, U_*^{\max} – минимальное и максимальное значения скорости движения воды в бассейне в точках соприкосновения с поверхностью заготовки.

Действительная скорость движения воды в точках соприкосновения фронта УВ с поверхностью заготовки определяется выражением [1, 14]

$$U_* = U_{**} \cdot \left(\frac{R_0}{x_{17}} \right)^3; \quad U_{**} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{x_{18}}{\rho^h} \cdot \frac{x_{22}}{(1 - R_0/x_{17})}},$$

где x_{22} – теплота взрыва заряда БВВ.

Изменение давления в точках водного пространства, через которое прошла УВ после взрыва заряда БВВ, определяется уравнением

$$\frac{p - p_0}{p_\Phi - p_0} = e^{-t/H},$$

где p_Φ – давление, возникающее в воде на фронте УВ.

Это изменение зависит от постоянной времени процесса χ . Безразмерная оценка, построенная на основе постоянной χ , является функцией

$$G_{1,6} = f_{1,6}(\chi^{\min}, \chi^{\max}, \chi), \quad (20)$$

где χ^{\min}, χ^{\max} – предельные значения постоянной времени изменения давления в точках водного пространства бассейна.

Действительное значение постоянной времени для случая сферического БВВ находится из выражения [7]

$$\chi^{\max} = 1,4 \frac{R_0}{c_0} \left(\frac{x_{17}}{R_0} \right)^{0,24}.$$

Множество оценок Y_2 (вспомогательная функция – S_2) в математической модели оценивает состояние газового пузыря из продуктов взрыва заряда БВВ: его движение и схлопывание в процессе создания усилия для проведения штамповки. В математической модели выполнение этой вспомогательной функции определяется тремя оценками

$$J_2 = \sum_{j=1}^3 y_{2,j}.$$

1. При взрыве заряда БВВ в толще воды образуется газовый пузырь с радиусом, который по мере движения УВ увеличивается в размерах. Критичность второго уровня здесь возникает в случае, когда этот *радиус газового пузыря* достигнет предельного значения и произойдет схлопывание его еще до момента соприкосновения с заготовкой, которая обычно расположена на дне бассейна.

Безразмерная оценка, учитывающая изменения радиуса газового пузыря, является функцией

$$G_{2,1} = \max(G_{2,1,i}, i = 1, 2, 3), \quad (21)$$

где $G_{2,1,i} = f_{2,1,i}(R_{\text{пуз},i}^{\min}, R_{\text{пуз},i}^{\max}, R_{\text{пуз},i})$ – оценка размеров газового пузыря, возникшего при движении i -й волны; $R_{\text{ПУВ},i}^{\min} = R_0$; $R_{\text{ПУВ},i}^{\max}$ – предельные значения радиуса газового пузыря, образованного i -й УВ.

Например, для первой УВ эта оценка имеет вид

$$G_{2,1,1} = 0,5 \left[1 + \left(\frac{R_{\text{ПУВ},1} - R_{\text{ПУВ},1}^{\min}}{R_{\text{ПУВ},1}^{\max} - R_{\text{ПУВ},1}^{\min}} \right)^2 \right].$$

2. Момент времени достижения газовым пузырем предельного состояния характеризуется еще другой оценкой – *продолжительностью его существования* – t_i . В безразмерном виде эта оценка в математической модели является функцией

$$G_{2,2} = \max(G_{2,2,i}, i = 1, 2, 3), \quad (22)$$

где $G_{2,2,i} = \max(t_{\Pi i}^{\max}, t_{\Pi i}^{\min}, t_{\Pi i})$; $t_{\Pi i}^{\min}$, $t_{\Pi i}^{\max}$ – предельные значения продолжительности существования газового пузыря в i -й УВ.

Действительное значение периода продолжительности существования газового пузыря определяется выражением [7, 15]

$$t_{\Pi i} = 0,90 \frac{R_0}{\sqrt{P_{im}}}.$$

3. Образование газовых пузырей при взрыве в воде сопровождается *пульсацией*. Период пульсации – T_{Π} является оценкой колебательных явлений, характеризующей выполнение СТС вспомогательной функции – S_2 . В математической модели выбирается наиболее критичный период пульсации. Он определяется выражением

$$G_{2,3} = \max(G_{2,3,i}, i=1,2,3), \quad (23)$$

где $G_{2,3,i}$ – безразмерная оценка периода пульсации, возникающая при действии i -й УВ; она является функцией

$$G_{2,3,i} = f_{2,3,i}(T_{\Pi}^{\max}, T_{\Pi}^{\min}, T_{\Pi}),$$

в которой T_{Π}^{\min} , T_{Π}^{\max} – минимальное и максимальные значения периода пульсации газового пузыря, возникающего при действии УВ в процессе штамповки взрывом.

Действительное значение периода пульсации находится из выражения [7]

$$T_{\Pi} = \frac{2,1\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}}{(10,33 + x_{17})^{5/6}}.$$

Построенная математическая модель функционирования УВ при взрыве в воде позволяет оценить развитие критичностей первого и второго уровней в процессе выполнения штамповки.

Модель с помощью вычислительной техники была апробирована для случаев использования зарядов из таких БВВ, как Гексопласт-87, тротил, аммонитах А-40 и А-50 [16, 17].

По результатам оценки критичностей при создании и движении УВ в воде можно утверждать следующее.

При значении комплексной оценки $J = 14 \cdot 0,5 = 7,0$ с точки зрения учтенных оценок выполнения основной (S_0) и вспомогательных (S_1 и S_2) функций развитие критичности происходит в расчетном режиме, так как все

значения оценок $y_{i,j}$ указывают, что не возникает ни одной критичности обоих уровней.

В случае когда значения комплексной оценки $Y = 14 \cdot 1,0 = 14,0$, развитие критичности, связанное с состоянием УВ, имеет нерасчетный характер по всем показателям $y_{i,j}$, которые оцениваются критичностей второго, а следовательно, и первого уровней.

Неприемлемое развитие критичностей второго уровня возникнет также в случае, когда, хотя бы один показатель $y_{i,j}$ примет максимально предельное значение – 1,0.

В таких случаях, по значению показателя $y_{i,j}$ определяется причина возникновения критичности: $X^* = \varphi(x : y_{i,j} = 1)$.

При значениях комплексной оценки J в диапазоне от 7,0 до 14,0 можно утверждать, что критичность УВ по ряду оценок может находиться в расчетном состоянии. В общем-то, анализируя значения оценок $y_{i,j}$, можно установить причину возникшей критичности второго уровня.

С помощью построенной математической модели можно оценить состояние УВ по возникновению критичности первого уровня при выполнении штамповки взрывом в воде. В целом, с помощью математической модели можно решать различные задачи оценки процесса создания силового воздействия с целью превращения заготовки в готовую поковку детали, в частности, такие:

- исследование процесса развития УВ с целью определения влияния параметров на модели оценки $y_{i,j}$;

- выявление причин возникновения нерасчетного состояния по показателям критичности второго уровня и разработка мероприятий по их предотвращению;

- оценка движения УВ с точки зрения безопасного выполнения процесса штамповки.

Выводы

1. Выполненный обзор исследований позволяет сказать о недостаточной изученности процессов, связанных с созданием механического усилия, используемого при пластическом деформировании заготовки, подвергающейся штамповке взрывом в воде.

2. Авторами рассмотрены следующие оценки, характеризующие выполнение главной функции при штамповке взрывом (масса заряда БВВ, амплитудные значения усилий, приложенных к заготовке, периоды пульсации УВ, удельные импульсы первых трех волн, энергоемкость

УВ), а также вспомогательных функций, связанных с работой гидротока (давление воды в бассейне до и после подрыва зарядом скорости детонационной волны и движения воды в бассейне, внутренняя энергия воды) и газового пузыря (радиус, продолжительность существования и период пульсации).

3. На основе предложенного описания построена математическая модель критичности в виде УВ, позволяющая рационально проводить технологический процесс штамповки взрывом для получения поковок крупногабаритных деталей авиационной и ракетной техники, спрогнозировать поведение УВ при создании силового воздействия для качественного выполнения процесса пластического деформирования заготовки.

4. Выполненные расчеты по построенной математической модели позволили установить связи между уровнями критичностей, а также оценить влияние на качество штамповки поковок крупногабаритных деталей ракеты различных размеров.

5. Предполагаемые теоретические положения могут быть использованы при получении оценки работоспособности УВ с точки зрения получения штамповкой взрывом поковок для качественных деталей, а также в практике оценки развития этих критичностей при использовании УВ в высокоскоростной обработке материалов.

6. Разработанные практические рекомендации нашли применение при изготовлении штамповкой взрывом днищ твердотопливного ракетного двигателя на одном из предприятий страны.

Библиографические ссылки

1. Штамповка взрывом. Основы теории / под ред. М. А. Анучина. М. : Машиностроение, 1972. 152 с.
2. Пихтовников Р. В., Завьялова В. И. Штамповка листового металла взрывом. М. : Машиностроение, 1964. 176 с.
3. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 648 с. ISBN 978-5-7038-3992-8.
4. Шарфарен Б. П. О динамике ударных волн в жидкости. Обзор // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 4. С. 43–54.
5. Уразбахтин В. Ф., Уразбахтин Ф. А. Интегрированная оценка критичности основного энергоносителя в штамповке взрывом крупногабаритных деталей ракеты // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 2. С. 104–113. DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-104-113.
6. Третьяк В. В., Онощенко А. В. Оптимизация расчетов заряда в технологических процессах взрывной штамповке // Авиационно-космическая техника и технологии. 2010. № 4. С. 30–37.

7. Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М. : Изд-во МГУ, 1990. 256 с.

8. Невешкин Ю. А., Остапчук В. В., Соломяный А. У. Определение сил при гидровзрыве в ограниченном объеме. Расчет сил от действия ударных волн // Металлофиз. новейшие технологии. 2015. Т. 37, № 2. С. 221–231.

9. Сидняев Н. И., Шипилова О. А. Воздействие подводного взрыва на гидродинамику и характер распространения возмущений // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 11. С. 1–23. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-11-1705.

10. Егоров С. Б. Методика экспериментальных исследований подводной ударной волны // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 16. С. 249–252.

11. Устройство и применение боеприпасов / Ю. А. Булаев [и др.]. Пермь : Стиль-МГ, 2004. 400 с.

12. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.

13. Кочина Н. Н., Мельникова Н. С. О взрыве в воде с учетом сжимаемости // Неустановившееся движение сжимаемых сред с взрывными волнами : труды математического института им. В. А. Стеклова. Москва, 1966. С. 35–65.

14. Володин Г. Т., Кочергин Д. С. Действие взрыва заряда взрывчатого вещества на элементы конструкции в воде // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула, 2019. Вып. 9. С. 232–235.

15. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М. : Наука, 1973. 416 с.

16. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. М. : Наука, 1977. 253 с.

17. Дубнов А. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М. : Недра, 1968. 370 с.

References

1. Anuchin M.A., Antonenkov O.D., ZHbanov YU.P., Nosikov S.M., Kulagin A.F. *Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii* [Blast stamping. Fundamentals of theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 152 p. (in Russ.).
2. Pihovnikov R.V., Zav'yalova V.I. *Shtampovka listovogo metalla vzryvom* [Sheet metal stamping by explosion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 176 p. (in Russ.).
3. Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2014, 648 p. (in Russ.).
4. Sharfaren B.P. [On the dynamics of shock waves in the liquid. Review]. *Russian Journal of Scientific instrumentation*, 2016, vol. 26, no. 4, pp. 43-54 (in Russ.).
5. Urazbahtin V.F., Urazbahtin F.A. [Integrated assessment of criticality of the main energy carrier

in stamping by explosion of large missile parts]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2011, no. 2, pp. 104-113 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-104-113.

6. Tret'yak V.V., Onopchenko A.V. [Optimization of charge calculations in explosive stamping processes]. *Russian Journal of Aerospace technology*, 2010, no.4, pp. 30-37 (in Russ.).

7. Selivanov V.V., Solov'ev V.S., Sysoev N.N. *Udarnye i detonacionnye volny. Metody issledovaniya* [Shock and detonation waves. Research methods]. Moscow, Moscow State University, 1990, 256 p. (in Russ.).

8. Neveshkin YU.A., Ostapchuk V.V., Solomyanyj A.U. [Determination of forces during hydraulic blasting in limited volume. Calculation of forces from impact waves]. *Russian Journal of Metallophysical latest technologies*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 221-231 (in Russ.).

9. Sidnyaev N.I., Shipilova O.A. [Impact of underwater explosion on hydrodynamics and nature of disturbance propagation]. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no.11, pp. 1-23 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-11-1705.

10. Egorov S.B. [Procedure for experimental studies of underwater shock wave]. *Journal of the University of Technology*, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 249-252 (in Russ.).

11. Bulaev YU.A., Ermilov A.S., Kozlov V.V., Kozlov D.S. *Ustrojstvo i primeneniye boepripasov* [Con-

struction and use of ammunition]. Perm: Style-MG, 2004, 400 p. (in Russ.).

12. Kedrinskij V.K. *Gidrodinamika vzryva: eksperiment i modeli* [Explosion Hydrodynamics: Experiment and Models]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000, 435 p. (in Russ.).

13. Kochina N.N., Mel'nikova N.S. [About explosion in water considering compressibility. Unidentified motion of compressible media with explosive waves]. *Works of the Moscow Mathematical Institute named after V.A. Steklova*, 1966, pp. 35-65. (in Russ.).

14. Volodin G.T., Kochergin D.S. [Explosive charge explosion action on structural elements in water]. *News of Tula State University. Technical sciences*, 2019, no. 9, pp. 232-235 (in Russ.).

15. Lavrent'ev M.A., SHabat B.V. *Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli* [Hydrodynamics problems and their mathematical models]. Moskva, Nauka, 1973, 416 p. (in Russ.).

16. Pozdnyakov Z.G., Rossi B.D. *Spravochnik po promyshlennym vzryvchatym veshchestvam i sredstvam vzryvaniya* [Handbook on Industrial Explosives and Explosives]. Moskva, Nauka Publ., 1977, 253 p. (in Russ.).

17. Dubnov A.V., Baharevich N.S., Romanov A.I. *Promyshlennye vzryvchatye veshchestva* [Industrial explosives]. Moskva, Nedra Publ., 1968, 370 p. (in Russ.).

Comprehensive Assessment of Criticality in the Form of a Shock Wave During Exploding Forming

V.F. Urazbakhtin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

F.A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Votkinsk branch, Votkinsk, Russia

The paper considers the possibility of quantifying the shock wave arising from the explosion of a charge of high explosive. Evaluation is proposed by many indicators characterizing the onset of criticality. Criticality indicators are estimates of performance of functions of the stamping process system. Criticality occurs if at least one system performance indicator does not match the set range. It has been shown that the development of criticality leads to an uncomputed motion mode of the shock wave.

The shock wave that occurs after the explosion of the charge of high explosive is the subject of special requirements during stamping. Meeting the requirements during plastic deformation of the workpiece will lead to the production of high-quality large-sized parts of rocket equipment. Non-compliance is considered critical.

The shock wave is necessary to perform the main function of the stamping system: power mechanical action and plastic deformation of the workpiece. The performance of this shock wave function is achieved as a result of auxiliary functions, for example, the movement of hydraulic flow in the stamping zone and the gas bubble formed during the explosion of the charge. The performance of each function is assessed by its criticality indicator. Indicators are combined into a mathematical model.

The article presents 16 indicators of criticality. With the help of a mathematical model, a complex assessment is calculated. The assessment indicates the degree of proximity of the occurrence of the non-calculated mode of impact wave action during stamping of large missile parts by explosion.

Keywords: shock wave, high explosive, explosive forming, criticality, complex system, main function, auxiliary function, parameters, criticality indicators, hydraulic flow, gas bubble, explosion products.

Получено: 21.11.21