

УДК 621.7.044.2

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-104-113

Интегрированная оценка критичности основного энергоносителя в штамповке взрывом крупногабаритных деталей ракеты

В. Ф. Уразбахтин, Воткинский филиал ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, Воткинск, Россия

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор,

Воткинский филиал ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, Воткинск, Россия

К взрывчатым веществам промышленного назначения (ВВ ПН) предъявляются специальные требования, жесткое соблюдение которых обеспечивает расчетную работоспособность основного энергоносителя процесса штамповки взрывом.

В этих условиях неизменно возникают критичности. В состоянии критичности в ВВ ПН происходят изменения параметров, которые приводят к нерасчетному процессу штамповки взрывом и некачественному изготовлению крупногабаритных деталей ракеты сложной конфигурации. Например, критичность, связанная со снижением детонационных свойств взрывчатого вещества, приводит к существенному изменению параметров ударной волны, и размеры деформированных заготовок с двойной кривизной в этом случае изменить обычными технологическими методами не представляется возможным.

Изменения параметров ВВ ПН должны находиться в пределах, при которых не возникают предельные (неработоспособные) состояния ни по одному показателю критичности.

В статье рассматривается возможность количественной оценки критичности, возникающей при переходе взрывчатого вещества от рабочего в неработоспособное состояние. Каждая оценка критичности проводится по характеристикам, принимаемым за интенсивность проявления отдельного свойства рассматриваемого ВВ ПН. В данной математической многофакторной модели состояние объекта оценивается 12 показателями критичности.

Вычисленная с помощью математической модели интегрированная оценка позволяет определить состояние взрывчатого вещества при хранении и в ходе проведения штамповки взрывом крупногабаритной детали ракеты. Значение этой оценки указывает степень близости наступления неработоспособного состояния.

Ключевые слова: сложная система, взрывчатые вещества промышленного назначения, интенсивность проявления свойства, состояния, параметры, показатели критичности.

Актуальность исследования

В конструкциях многоступенчатых ракет используются крупногабаритные детали сложной формы, изготовленные из алюминиевых, жаростойких, нержавеющей и титановых сплавов. Создание таких деталей затруднено из-за сложности формы (например, днища баков жидкостных ракет имеют двоякую кривизну) и затруднений механической обработки. Большие габаритные размеры этих деталей и необходимость полного выполнения технических требований приводят к необходимости использования специального технологического оборудования и оснастки.

Наиболее подходящий с экономической точки зрения метод изготовления таких крупногабаритных деталей основан на обработке давлением, например, с помощью листовой штамповки.

Изготовление таких деталей ракет усложнено в силу действия следующих отрицательных факторов:

– процесс происходит на предприятиях опытного или единичного производства, отличающийся существенными экономическими затратами;

– при формообразовании крупногабаритных деталей штамповкой многократно возрастают необходимые усилия, которые должны создавать прессовое оборудование. В то же время на существующем оборудовании возможности создания таких усилий отсутствуют.

Преодоление этих факторов стандартными методами связано со значительным повышением себестоимости изготовления этих деталей. Необходимость обеспечения приемлемой точности при их изготовлении еще более ее увеличивает.

Рациональное изготовление крупногабаритных, высокоточных деталей ракетной техники достигается при применении высокоэнергетических процессов штамповки. Использование для формообразования деталей ракет энергии взрывчатых веществ промышленного назначе-

ния (ВВ ПН) позволяет небольшими партиями создавать крупногабаритные детали сложной конфигурации из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов с низкими технологическими свойствами [1].

Штамповка взрывом позволяет получить крупногабаритные детали с помощью давления ударной волны, создаваемой в процессе быстротекущего химического превращения ВВ ПН. В этом методе ВВ ПН является *основным энергонесущим элементом* процесса штамповки. От его состояния и свойств зависит качество изготовления деталей ракет. В этом случае возникает задача построения математической модели интегрированной оценки состояния ВВ ПН для проведения технологической операции штамповки взрывом, решение которой и является *целью данной работы*.

Теоретические положения

ВВ ПН являются смесью химических элементов, которые под действием внешних возмущений осуществляют кратковременное выделение энергии, с помощью которой совершается механическая работа [2].

Считаем ВВ ПН сложной системой, которая проявляет свойства (особенности) за счет предварительного накопленного энергозапаса [3]. Обоснованность такого допущения подтверждается наличием в системе свойств [4, 5]: *целостности*, заключающейся в присутствии взаимодействующих химических элементов в ВВ ПН; *связности*, предполагающей наличие интегративных свойств в системе, образованных из особенностей составных элементов; *организованности*, состоящей в наличии механизма преобразования одного в другой вид собственной энергии (энергозапаса), и *интегративности*, согласно которой отсутствуют свойства у элементов, не определяющих интегративные свойства всей системы.

Интегративные свойства в выбранной сложной системе – ВВ ПН $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{12}\}$ имеют различный физический характер. В данной работе интерес представляют следующие свойства [6–11].

1. *Детонация* (S_1) – это способность ВВ ПН распространяться в ходе своего взрывчатого превращения, создавая фронт ударной волны, который двигается внутри ВВ ПН с максимально возможной и постоянной скоростью. Движение этой волны достигается за счет выполнения работы, совершаемой продуктами быстротекущей химической реакции в зоне превращения ВВ ПН.

2. *Бризантность* (S_2) – это способность ВВ ПН к местному дроблению и деформированию материала заготовки с помощью действия ударной волны, создаваемой продуктами взрыва. В результате возникшего удара продуктов детонации на окружающую среду создается местное силовое поле.

3. *Чувствительностью* (S_3) считается способность ВВ ПН к взрывным превращениям под воздействием начального импульса. ВВ ПН, обладающие таким свойством, создают опасность использования при штамповке взрывом. Наиболее существенными являются температурный и ударный импульсы.

4. Способность осуществлять взрывчатое превращение происходит в результате окислительной реакции химических элементов, входящих в состав ВВ ПН. «Окислительная» способность ВВ ПН непосредственно связана с количеством кислорода (S_4).

5. ВВ ПН является объективной реальностью в виде материала, который занимает в окружающем мире определенный объем и обладает конечной массой. Способность *существования* ВВ ПН в виде материала характерна для рассматриваемой сложной системы (S_5). Только при наличии этой реальности происходит детонационный процесс и создается мощность в виде и количестве, необходимом для выполнения взрывной штамповки.

6. *Теплотворность* (S_6) характерна для ВВ ПН как свойство, связанное с образованием тепловой энергии в ходе взрывчатого превращения. Передача этой энергии в окружающую среду происходит с помощью газообразных продуктов сгорания.

7. ВВ ПН как система обладает термодинамическими свойствами, отражением которых является проявление способности *накапливать тепло* (S_7). Эти свойства проявляются в виде теплового движения молекул газообразных продуктов сгорания ВВ ПН.

8. ВВ ПН при взрыве создает *детонационные (ударные) волны* (S_8), движение которых происходит за счет скачкообразного изменения давления. Появление этих волн порождено самораспространяющимися химическими превращениями. Движение газообразных продуктов горения в виде скачков давления начинается от места взрыва.

9. *Работоспособность* (S_9) отражает возможность ВВ ПН совершать механическую работу газообразными продуктами химического

превращения в виде пластического деформирования заготовки. Эти продукты подвергаются адиабатическому расширению до того момента времени, когда давление продуктов взрыва уравновешивается давлением окружающей среды.

10. ВВ ПН состоит из твердых частиц, гранул либо зерен, распределение размеров которых характеризуют *дисперсность* (S_{10}). От степени дисперсности ВВ ПН зависит проявление других свойств, в частности, детонационная способность и стойкость.

11. Свойство *сыпучести* проявляется в случае, когда под воздействием собственного веса ВВ ПН высыпается из упаковки и заполняет формы зарядов (S_{11}) определенным образом. На процесс заполнения влияют форма и размеры зерен (гранул), а также наличие влажности и примесей в ВВ ПН.

12. *Стойкостью* считается способность ВВ ПН сохранять после длительного хранения неизменными химические и физические свойства, связанные с взрывными превращениями (S_{12}).

Физическая стойкость определяется способностью ВВ ПН сохранять с течением времени неизменными плотность, прочность, гигроскопичность и слеживаемость. Химическая стойкость характеризует способность ВВ ПН сохранять в процессе длительного хранения неизменным химический состав. На проявление этого свойства согласно ГОСТ 12.1044–84 влияет содержание и связи между химическими элементами ВВ ПН, а также наличие в нем примесей и условия хранения.

За меру проявления свойств в сложной системе ВВ ПН принимаются *интенсивности* $G\{G_i, X : S \Rightarrow Z; i = 1, 12\}$, количественные меры которых зависят от параметров, составляющих конечное множество $X = \{x_i, i = \overline{1, 16}\}$.

Составляющие этого множества x_i имеют различное физическое содержание, значения которых определяются экспериментальными либо аналитическими методами.

В совокупности проявления свойств S в сложной системе происходят одновременно. Это обстоятельство позволяет ввести понятие «структура» сложной системы ВВ ПН $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ как совокупность значений интенсивностей проявлений свойств S в текущий момент времени [12].

В каждый текущий момент времени t_i интенсивности z_i принимают значения, которые в совокупности определяют состояние сложной системы ВВ ПН:

$$C = \{t_i : z_1(t_i), z_2(t_i), \dots, z_m(t_i); t_i \in [0, T]\}. \quad (1)$$

В этом случае процесс функционирования сложной системы ВВ ПН представляется в виде последовательной смены состояний (рис. 1).

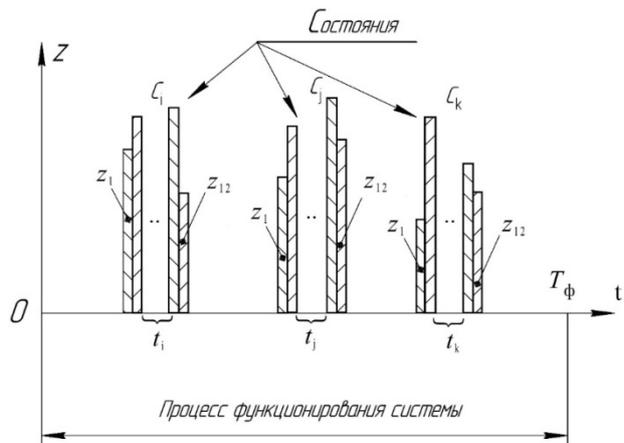


Рис. 1. Структура сложной системы ВВ ПН

Анализ сложной системы ВВ ПН позволяет множество состояний разделить на две группы (рис. 2), как это сделано в ГОСТ 27.002–2015:

– *рабочие состояния*, при которых свойства ВВ ПН соответствуют всем требованиям, определенным регламентными документами на эксплуатацию. В этом состоянии ВВ ПН, как сложная система, способна выполнять требуемые функции – свершение взрыва с заданными характеристиками;

– *неработоспособные состояния*, при которых ВВ ПН «не удастся» выполнить одну или несколько требуемых функций. Предельным является случай неработоспособного состояния, при котором не выполняется ни одна из функций, определенная регламентными документами на эксплуатацию ВВ ПН.

Интерес представляют состояния сложной системы – ВВ ПН, которые располагаются при переходе от рабочих к неработоспособным состояниям (рис. 2). Этот переход для сложной системы сопровождается, как правило, потерями (ущербом) и назван нами *критичностью*. Функционирование сложной системы в состоянии критичности обладает неопределенностью, зачастую из-за того, что неизвестно проявление какого свойства, либо оно проявляется с недостаточной интенсивностью, которая необходима для выполнения штамповки взрывом. Выявление таких состояний предлагается проводить с помощью специальной многофакторной математической модели.

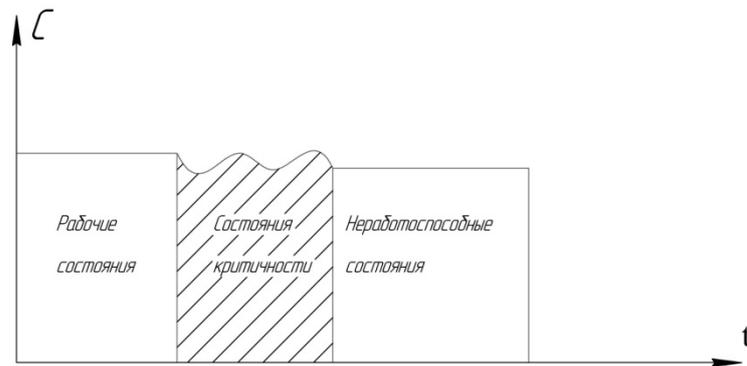


Рис. 2. Состояния сложной системы – ВВ ПН

Построение многофакторной математической модели

В этой модели поведение сложной системы оценивается с помощью множества оценок (показателей), каждая из которых определяет степень критичности ВВ ПН, возникающую в ходе проявления отдельного свойства.

Считается, что все случаи возникновения критичности связаны с проявлением свойств ВВ ПН, количественной мерой которых является интегрированная оценка – Y . Предполагая проявления всех свойств S_1, S_2, \dots, S_{12} происходящими равнозначно, интегрированную оценку, учитывающую все предъявляемые требования к ВВ ПН, представляем в виде

$$Y = \sum_{i=1}^2 Y_i, \quad (2)$$

где Y_i – оценки критичности групп свойств, определяющие качество сложной системы.

В оценке (2) выделено две группы свойств. Первую группу Y_1 составляют оценки свойств, характеризующие качество ВВ ПН, непосредственно используемое в штамповке взрывом – $S_1, S_2, S_4, S_5, S_7, S_8, S_9$. Вторая группа Y_2 содержит оценки свойств, которые характеризуют качество ВВ ПН – $S_3, S_6, S_{10}, S_{11}, S_{12}$, проявляемые при его хранении.

Каждая оценка Y_i определяется соответствующими безразмерными показателями критичности y_i , которые считаются равнозначными:

$$Y_1 = y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + y_8 + y_9; \quad (3)$$

$$Y_2 = y_3 + y_6 + y_{10} + y_{11} + y_{12}, \quad (4)$$

где каждый показатель y_i отображает проявление i -го свойства: $S_i \rightarrow y_i$.

При составлении выражений для показателей критичности y_i принимаются следующие допущения.

1. За меру критичности принимается степень соответствия требованиям и ограничениям ВВ ПН при хранении и использовании в штамповке взрывом.

2. Каждый показатель критичности y_i является оценкой, характеризующей степень выполнения отдельного условия (требования). Он определяет «местонахождение» значения интенсивности проявления соответствующего свойства в предварительно установленном диапазоне.

3. Все оценки показателей критичности y_i в многофакторной математической модели безразмерны. Нормирование проведено так, что наилучшее значение, равное 0,5, соответствует случаю отсутствия критичности. В то же время наихудшее имеет значение показателя критичности – 1,0, при котором проявление оцениваемого свойства однозначно выполняется с нарушением установленного технического требования. Развитие этой критичности при дальнейшем функционировании сложной системы – ВВ ПН приведет к неприемлемым последствиям с точки зрения оцениваемого свойства.

Показатели критичности имеют следующую форму представления:

$$y_i = \begin{cases} 0,5, & \text{если } G_i \leq 0,5; \\ 1,05, & \text{если } G_i \geq 1,0; \\ G_i & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

где G_i – безразмерная интенсивность проявления i -го свойства сложной системы – ВВ ПН.

Критичность имеет место в случае, когда в ходе функционирования сложной системы – ВВ ПН значение хотя бы одной функции интенсивности G_i будет находиться в диапазоне

$$1,0 > G_i > 0,5.$$

Рассмотрим выражения показателей критичности y_i в многофакторной математической модели вида (2)–(5) [13–20].

В *первую группу* Y_i входит семь показателей критичности ВВ ПН.

1. **Детонационная способность** зависит от химического состава, вида и плотности твердого ВВ ПН. В показателе критичности y_1 за интенсивность проявления этого свойства принимается скорость детонации – $D_{ВВ}$. Безразмерная интенсивность является функцией параметров состояния:

$$G_1 = f_1(D_{\max}, D_{\min}, D_{ВВ}, \rho_{ВВ}, \rho_{кр}, M_{ВВ}, x_1, \dots, x_9), \quad (6)$$

где D_{\max} , D_{\min} – максимальная и минимальная скорости детонации; $\rho_{кр}$, $\rho_{ВВ}$ – критическая и текущая плотности ВВ ПН; $M_{ВВ}$ – молекулярная масса ВВ ПН; x_1, x_2, x_3, x_4 – количество атомов в молекуле, соответственно, кислорода, азота, фтора, водорода; x_5, x_6 – количество молекул фтористого водорода и свободного кислорода, которые могут сформироваться при $K_B > 1$; x_7, x_8 – количество атомов кислорода, присоединенных одинарной и двойной связью к углероду; x_9 – количество нитрогрупп, существующих в виде кислотных остатков.

На основе данных о ВВ ПН функция (6) определяется выражениями

$$G_1 = 0,5 \left[1 + \left(\frac{D_{\max} - D_{ВВ}}{D_{\max} - D_m} \right)^2 \right]; D_{ВВ} = D_m - 3(\rho_{кр} - \rho);$$

$$D_m = \frac{F - 0,26}{0,25};$$

$$F = 100 \left[\frac{\varphi + \psi}{M} \right]; \varphi = x_1 + x_2 - \frac{x_4 - x_5}{2 \cdot x_1} + x_3;$$

$$\psi = \frac{1}{3} - \frac{x_6}{1,75} - \frac{x_8}{2,5} - \frac{x_7}{4} - \frac{x_9}{5}.$$

2. **Бризантность** зависит от потенциальной энергии, фугасного действия, удельного объема и теплоемкости газообразных продуктов взрыва ВВ ПН. За интенсивность проявления этого свойства принимается величина обжатия свинцовых столбиков под действием взрыва – $\Delta H = x_{10} - x_{11}$, получаемая в результате проведения специальных испытаний.

Безразмерная функция интенсивности проявления свойства бризантности для показателя y_2 имеет вид

$$G_2 = f_2(H_{\max}, H_{\min}, \Delta H, x_{10}, x_{11}),$$

где H – значения бризантности ВВ ПН, методика определения которого дана в ГОСТ 5984–99; H_{\max}, H_{\min} – предельные значения бризантности ВВ ПН, используемого в штамповке взрывом; x_{10}, x_{11} – высоты свинцового цилиндра после и до проведения испытания на бризантность.

3. **Окислительная способность** характеризует насыщенность кислородом ВВ ПН. За интенсивность проявления этого свойства принимается кислородный баланс ВВ ПН – K_B , который определяется выражением

$$K_B = \frac{16[x_1 - (2x_8 + 0,5x_4)]}{M_{ВВ}} \cdot 100 \%$$

Для показателя y_4 безразмерная функция интенсивности в (5) представляется в виде

$$G_4 = f_4(K_B^{\max}, K_B^{\min}, K_B, x_1, x_4, x_8, M_{ВВ}),$$

где K_B^{\max}, K_B^{\min} – предельные установленные значения кислородного баланса ВВ ПН.

4. **Существование** ВВ ПН подтверждается наличием плотности – $\rho_{ВВ}$, которая принимается за интенсивность проявления этого свойства. Она определяется опытным путем, как это определено в ГОСТ 14839.18–20.

Безразмерная функция интенсивности для показателя y_5 имеет вид

$$G_5 = f_5(\rho_{\min}, \rho_{кр}, \rho_{ВВ}, M_{ВВ}),$$

где ρ_{\min} – минимальное значение плотности ВВ ПН.

5. В показателе критичности y_7 вида (5) **по тепловому воздействию**, создаваемому ВВ ПН на окружающую среду, за интенсивность принята температура взрыва, которая определяется выражением

$$T_{ВЗР} = \frac{A_{ВЗР}}{B_{ВЗР}},$$

где

$$A_{ВЗР} = -\sum n_i a_i + \sqrt{[\sum n_i a_i]^2 + 4[\sum n_i b_i] Q_{ВЗР} \cdot 10^3};$$

$B_{ВЗР} = \sum n_i b_i$, – коэффициенты, учитывающие содержание компонентов в ВВ ПН; a_i, b_i – эм-

пирические коэффициенты i -го компонента продукта ВВ; n_i – число молей в i -м компоненте, образующемся в продукте ВВ ПН.

Безразмерная функция интенсивности проявления этого свойства имеет вид

$$G_7 = f_7(T_{\max}^b, T_{\min}^b, T_{\text{ВЗР}}, Q_{\text{ВЗР}}, \rho_{\text{ВВ}}),$$

где T_{\max}^b, T_{\min}^b – предельные значения температуры взрыва ВВ ПН при выполнении штамповки.

Количество теплоты, выделившейся при взрыве, определяется выражением

$$Q_{\text{ВЗР}} = Q_{\max} \cdot K_p,$$

где $K_p = 1 - (0,528 - 0,165\rho_{\text{ВВ}}) \cdot (1,4 - K_B)$;

$$Q_{\max} = \frac{\sum \Delta H_{\max} - \Delta H_f}{M_{\text{ВВ}}} \cdot 1000;$$

$$\Delta H_f = \begin{cases} \sum \Delta H_{\max} & \text{при } K_B \geq 1,15; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\sum \Delta H_{\max} = \begin{cases} -393,5x_8 - 120x_4 - 150,2x_3 & \text{при } K_B \geq 100 \%, \\ -22,6x_4 - 196,6x_2 - 293,7x_3 & \text{при } K_B < 100 \%. \end{cases}$$

6. **Действие ударных (детонационных) волн**, создаваемых ВВ ПН, характеризуется изменением давления. За интенсивность проявления этого свойства в показателе y_8 принято давление продуктов взрыва на фронте детонационной волны – $p_{\text{ВЗР}}^{\max}$;

$$p_{\text{ВЗР}} = \frac{p_0 V_{\text{ПВ}} T_{\text{ВЗР}} \rho_{\text{ВВ}}}{273(1 - \alpha_1 \rho_{\text{ВВ}})},$$

где $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$, Па – атмосферное давление газов; $\alpha_1 = \begin{cases} 0,001 V_{\text{ПВ}}, & \text{если } \rho_{\text{ВВ}} > 1000 \text{ кг/м}^3; \\ 0,0006 V_{\text{ПВ}}, & \text{если } \rho_{\text{ВВ}} < 1000 \text{ кг/м}^3 \end{cases}$ – поправка, учитывающая собственный объем, занимаемый 1 кг ВВ ПН при плотности $\rho_{\text{ВВ}}$; $V_{\text{ПВ}}$ – объем продуктов взрыва.

Безразмерная функция интенсивности в показателе критичности y_8 имеет вид

$$G_8 = f_8(p_{\text{ВЗР}}^{\max}, p_{\text{ВЗР}}^{\min}, p_{\text{ВЗР}}, T_{\text{ВЗР}}, V_{\text{ПВ}}, \rho_{\text{ВВ}}),$$

где $p_{\text{ВЗР}}^{\max}, p_{\text{ВЗР}}^{\min}$ – предельные значения давления детонационной волны, необходимые для процесса штамповки взрывом.

7. **Работоспособность** оценивается совершаемой работой газами ВВ ПН. Поскольку она непосредственно связана с выделяемым теплом, то здесь за интенсивность принимается относительная работоспособность ВВ ПН:

$$f = \left[\frac{Q_{\text{ВВ}}}{1031} \right]^{0,75} \left[\frac{V_{\text{ПВ}}}{893} \right]^{0,25},$$

где $Q_{\text{ВВ}} \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right]$ – расчетное значение теплоты.

Объем продуктов взрыва ВВ ПН $V_{\text{ПВ}}$ принимается в л/кг.

Безразмерная функция интенсивности этого свойства в показателе критичности y_9 представляется в виде

$$G_9 = f_9(f_{\max}, f_{\min}, f, Q_{\text{ВВ}}, V_{\text{ПВ}}).$$

Во вторую группу Y_2 входит пять показателей критичности. Это показатели, которые характеризуют критичность при сопротивлении воздействиям внешней среды в ходе процесса хранения ВВ ПН.

1. **Чувствительность** в математической модели отражает сопротивляемость внешним воздействиям в виде теплового и ударного импульсов. В показателе критичности y_3 используются безразмерные функции интенсивности. Среди них за определяющую принимается та, которая имеет наибольшее значение:

$$G_3 = \max(G_{3,1}, G_{3,2}, G_{3,3}, G_{3,4}).$$

С помощью составляющих

$$G_{3,1} = f_{3,1}(T_{\text{ВСП}}^{\max}, T_{\text{ВСП}}^{\min}, T_{\text{ВСП}});$$

$$G_{3,2} = f_{3,2}(\tau_{\text{ВСП}}^{\max}, \tau_{\text{ВСП}}^{\min}, \tau_{\text{ВСП}})$$

оценивается чувствительность ВВ ПН к воздействию теплового импульса по определяемым экспериментально температуре вспышки $T_{\text{ВСП}}$ и длительности воздействия тепла – $\tau_{\text{ВСП}}$. В этих функциях: $T_{\text{ВСП}}^{\max}, T_{\text{ВСП}}^{\min}$ – предельные температуры вспышки для данного ВВ ПН; $\tau_{\text{ВСП}}^{\max}, \tau_{\text{ВСП}}^{\min}$ – предельные значения длительности, при которых ВВ ПН подвергается тепловому воздействию с температурами, соответственно, $T_{\text{ВСП}}^{\max}$ и $T_{\text{ВСП}}^{\min}$.

Составляющие функции интенсивности

$$G_{3,3} = f_{3,3}(K_{\max}, K_{\min}, K_y); G_{3,4} = f_{3,4}(P_1^{\max}, P_1^{\min}, P_y)$$

в G_3 являются оценками проявления свойства чувствительности к воздействию ударного им-

пульса. В них K_{\max}, K_{\min} – предельные значения энергии удара, который действует на установленную навеску ВВ ПН массой $m_p = 0,02$ г; P_1^{\max}, P_1^{\min} – предельные количества взрывов, возникающих в ходе испытаний при падении эталонного груза массой $m_p = 10$ кг с высоты $H_p = 26$ см на установленную навеску ВВ ПН.

Значения энергии удара, наносимого по навеске, определяется выражением $K_y = m_p g (H_y - H_0)$. Количество взрывов от падающего эталонного груза P_y подсчитывается в ходе проведения серии специальных испытаний. Согласно ГОСТ 4545–88 имеем: H_0 – минимальная высота падения груза, при которой наблюдается 100%-е количество отказов взрыва, H_y – максимальная высота, при которой наблюдается 50%-е количество взрывов.

2. **Теплотворная способность** проявляется у ВВ ПН с интенсивностью, за которую принята теоретическая теплота взрыва Q_V . Ее предлагается определять с помощью выражений, выведенных на основе формулы Г. А. Авакяна

$$Q_V = \begin{cases} 0,32K_B^{0,24} (94x_8 + 28,75x_4) + \Delta H_{\text{ВВ}}^0 & \text{при } K_B \geq 100 \% ; \\ 0,32 \cdot K_B^{0,24} (47x_1 + 5,25x_4) + \Delta H_{\text{ВВ}}^0 & \text{при } K_B < 100 \% , \end{cases}$$

где $\Delta H_{\text{ВВ}}^0$ – теплота образования ВВ ПН.

В показателе критичности y_6 безразмерная интенсивность проявления свойства представляется в виде

$$G_6 = f_6(Q_V^{\max}, Q_V^{\min}, Q_V, x_1, x_4, x_7, \Delta H_{\text{ВВ}}^0, K_B),$$

где Q_V^{\max}, Q_V^{\min} – предельные значения теплотворности ВВ ПН.

3. При оценке проявления свойства **дисперсности** за интенсивность принимается приведенный средний диаметр частиц ВВ ПН сферической формы

$$d_{\text{cp}} = \sqrt[3]{\frac{1}{M_H} [x_{12}a_1^3 + x_{13}a_2^3 + x_{14}a_3^3]},$$

где x_{12}, x_{13}, x_{14} – массы частичек установленных для испытания в навески ВВ ПН с диапазонами диаметров d соответственно, более 2,0 мм, от 0,9 до 2,0 мм и менее 0,9 мм; a_1, a_2, a_3 – разме-

ры сторон ячеек в ситах № 2, 09 и 04, определенных ГОСТ 14839.18–20; $M_H = m_1 + m_2 + m_3$ установленная для испытания навеска ВВ ПН, используемая в процессе просеивания на ситах.

В показателе критичности y_{10} эта безразмерная функция интенсивности имеет вид

$$G_{10} = f_{10}(d_{\min}, d_{\max}, d_{\text{cp}}, x_{12}, x_{13}, x_{14}),$$

где d_{\min}, d_{\max} – предельные размеры частиц ВВ ПН, приведенные к сферической форме.

4. Считаем, что проявление свойства **сыпучести** происходит с интенсивностью, за которую принимается угол естественного откоса при свободном высыпании ВВ ПН на горизонтальную поверхность α_c .

Безразмерная функция интенсивности в показателе критичности y_{11} имеет вид

$$G_{11} = f_{11}(\alpha^*, \alpha_c),$$

где α^* – максимальный угол откоса при свободном высыпании ВВ ПН на горизонтальную плоскость в виде зерен или гранул.

Угол откоса ВВ ПН α_c рассчитывается по результатам проведенного испытания

$$\alpha_c = \arctg \frac{D_0 - d_{\text{ц}}}{2x_{15}},$$

где $d_{\text{ц}}$ – внутренний диаметр цилиндра лабораторного прибора; D_0 – диаметр основания; x_{15} – высота подъема цилиндра в ходе проведения испытания.

5. В показателе критичности проявления свойства **стойкости** y_{12} необходимо из двух безразмерных функций интенсивности выбрать наиболее опасную с позиций возникновения критичности:

$$G_{12} = \max\{G_{12,1}, G_{12,2}\}.$$

Здесь $G_{12,1} = f_{12,1}(\tau_{\text{хрут}}, \tau_{\text{хрн}}, \tau_{\text{хр}})$,

$G_{12,2} = f_{12,2}(\tau_{\text{раз}}^{\max}, \tau_{\text{раз}}^{\min}, \tau_{\text{раз}})$ являются безразмерными функциями проявления физической и химической стойкости.

При оценке физической стойкости за интенсивность принимается «возраст» ВВ ПН $\tau_{\text{хр}}$, начиная от момента его создания и до непосредственного использования по назначению – созданию взрыва при изготовлении деталей. Предельными значениями этого «возраста» в функции $G_{12,1}$ принимается: минимальный –

нормативный срок хранения $\tau_{\text{хрн}}$, максимальный момент времени использования ВВ ПН (или его утилизации) обозначим как $\tau_{\text{хрут}}$.

За интенсивность проявления свойства химической стойкости ВВ ПН принимается продолжительность химического разложения $\tau_{\text{раз}}$. Эта характеристика зависит от химической природы ВВ ПН, наличия нестойких примесей, а также условий хранения.

В безразмерной функции интенсивности $G_{1,2}$ используются $\tau_{\text{раз}}^{\text{max}}, \tau_{\text{раз}}^{\text{min}}$ – предельные значения момента времени химического разложения ВВ ПН. Фактическая длительность химического разложения ВВ ПН определяется выражением

$$\tau_{\text{раз}} = \frac{1}{R_2} \ln \left(\frac{100}{100 - x_{16}} \right),$$

где R_2 – константа скорости реакции разложения, показывающая долю ВВ ПН разлагающегося в единицу времени, x_{16} (в %) – концентрация разложившегося ВВ ПН до неприемлемого уровня для использования ВВ ПН в штамповке.

Представленная математическая модель позволяет оценить критичности основного энергоносителя в процессе выполнения штамповки взрывом. Она была апробирована и показала при моделировании хорошие результаты при оценке критичностей в таких ВВ ПН, как Гексопласт – 87, аммонитах А-40 и А-50. По полученным результатам оценки критичности ВВ ПН можно утверждать следующее.

При значении интегрированной оценки $Y = 10,0$ применение ВВ ПН в процессе штамповки взрывом весьма рискованно по всем показателем критичности y_i . Неприемлемая критичность также возникает в случае, когда хотя бы один показатель критичности y_i достигает максимально предельное значение 1,0. В таких случаях по установленному показателю y_i не представляло затруднений установить причину (то есть свойство) возникшему предельному состоянию.

При значениях интегрированной оценки Y в диапазоне от 0,5 до 1,0 можно утверждать, что по ряду проявлений свойств ВВ ПН находится в состоянии критичности. Анализируя значения показателей y_i , можно определить, какое именно свойство оказалось причиной возникновения критичности.

С помощью разработанной математической модели можно решать задачи оценки состояния и работоспособности ВВ ПН, а также осуществлять оценку качества ВВ ПН с точки зрения безопасного использования в процессе штамповки и выявлять причины возникновения критичности с последующей разработкой мероприятий по их предотвращению.

Выводы

1. Выполненный обзор исследований позволяет сказать о недостаточной изученности процессов, связанных с безопасным использованием ВВ ПН в штамповке взрывом и хранением.

2. Авторами рассмотрены следующие свойства, определяющие качество ВВ ПН при проведении штамповки взрывом крупногабаритных деталей ракеты и возможность его длительного хранения: детонация, бризантность и окислительная способность, плотность, теплотворность, способности накапливать тепло, создавать ударные волны, а также работоспособность, дисперсность, сыпучесть и стойкость.

Введено понятие *критичность*, характеризующее переход от рабочего в нерабочее состояний.

3. На основе предложенного описания создана математическая модель, позволяющая рационально построить технологический процесс штамповки взрывом крупногабаритных деталей для ракетной техники, спрогнозировать и управлять поведением ВВ ПН на таких стадиях жизненного цикла, как хранение и непосредственное использование по назначению в штамповке.

4. Выполненные расчеты по предложенной математической модели позволили определить степень критичности конкретных ВВ ПН и оценить влияние на качество штамповки крупногабаритных деталей ракеты.

5. Предлагаемые теоретические положения могут быть использованы при получении оценки работоспособности ВВ ПН с точки зрения использования при получении штамповкой качественных деталей, а также в практике оценки состояния длительно хранящихся на специальных складах.

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

Библиографические ссылки

1. Тлустенко С. Ф., Сытник В. А. Формообразование деталей взрывными процессами по условиям точности сборки агрегатов летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 5 (36). С. 108–112.
2. Руководство для инженерных войск. Подрывные работы. М. : Воениздат, 1959. 496 с.
3. Уразбахтин Ф. А. Создание технических устройств с учетом функционирования в критических состояниях // Автоматизация и современные технологии, 1999. № 4. С. 25–27.
4. Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Основы теории сложных систем. М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 620 с. ISBN 978-5-93972-558-3.
5. Морсанов И. С. О теории систем. М. : Компания Спутник+, 2003. 20 с. ISBN 5-93408-465-7.
6. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М. : Наука, 1959. 800 с.
7. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. – М. : Недра, 1977. 253 с.
8. Пихтовников Р.В., Завьялов В.И. Штамповка листового металла взрывом. М.: Машиностроение, 1964. 176 с.
9. Дубнов А. В., Бахаревиц Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М. : Недра, 1988. 370 с. ISBN 5-247- 00285-7.
10. Лопанов А. Н. Взрывы и взрывчатые вещества. Белгород: Изд-во Белгородского гос. технологического ун-та им. В. Г. Шухова, 2008. 516 с.
11. Афанасенков А. И., Котова Л. И., Кухиб Б. Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 115–125.
12. Уразбахтин Ф. А. Критические ситуации в процессе жизненного цикла технических систем // Современные аспекты компьютерной интеграции машиностроительного производства : материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2003. С. 6–10.
13. Теория взрывчатых веществ. Сборник статей. М. : Оборонгиз, 1963. 597 с.
14. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. М. : Мир, 1973.
15. Физика взрыва. Т. 2. / Л. П. Орленко. М. : Физматлит, 2002. 644 с. ISBN 5-9221-0220-6.
16. Оценка относительной работоспособности современных ВВ / Е. И. Жученко, В. Б. Иоффе, Б. Н. Кухиб, А. Б. Фролов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 1/6. С. 208–2013.
17. Афанасенков А. И. О работоспособности взрывчатых веществ. Метод Трауця // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 132–139.
18. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 435 с. ISBN 5-7692-0220-7.
19. Жарков В.В., Псел К.Н., Токарев В.Ю. Экспериментальное определение сыпучести сухих строительных смесей//Известия ТулГУ. Технические науки, 2013, вып.10, с.288-297.
20. Pyzhov A.M., Tarasov A.K., Usenko A.G., Pyzhova T.I., Abramov A.A. *Sposob ocenki sypuchesti poroshkoobraznyh veshhestv i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method for evaluation of powdery substances looseness and device for its implementation]. Patent RF, no. 2541726 C2, 2015.

References

1. Tlustenko S.F., Sytnik V.A. [Forming of parts by explosive processes according to the conditions of accuracy of aircraft assemblies assembly]. *Vestnik Samar-skogo gosudarstvennogo azerokosmicheskogo univ-ersiteta*, 2012, no. 5(36), pp. 108-112 (in Russ.).
2. *Rukovodstvo dlja inzhenernyh vojsk. Podryvnye raboty* [Manual for Engineering Troops. Subversion]. Moscow, Voennoe Publ., 1959, 496 p. (in Russ.).
3. Urazbahtin F.A. [Creation of technical devices with regard to functioning in critical states]. *Avtomati-zacija i sovremennye tehnologii*, 1999, no. 4, pp. 25-27 (in Russ.).
4. Loskutov A.Ju., Mihajlov A.S. *Osnovy teorii slozhnyh system* [Fundamentals of Complex Systems Theory]. Moscow, Izhevsk, Research Centre Regular and chaotic dynamics, 2007, 620 p. (in Russ.).
5. Morsanov I.S. *O teorii system* [On the theory of systems]. Moscow, Sputnik +, 2003, 20 p. (in Russ.).
6. Baum F.A., Stanjukovich K.P., Shehter B.I. *Fizika vzryva* [Explosion Physics]. Moscow, Science, 1959, 800 p. (in Russ.).
7. Pozdnjakov Z.G., Rossi B.D. *Spravochnik po promyshlennym vzryvchatym veshhestvam i sredstvam vzryvaniya* [Handbook on Industrial Explosives and Explosives]. Moscow, Subsoil, 1977, 253 p. (in Russ.).
8. Pihovnikov R.V., Zav'jalov V.I. *Shtampovka listovogo metalla vzryvom* [Sheet metal stamping by explosion]. Moscow, Mashinostrienie Publ., 1964, 166 p. (in Russ.).
9. Dubnov A.V., Baharevich N.S., Romanov A.I. *Promyshlennye vzryvchatye veshhestva* [Industrial explosives]. Moscow, Subsoil, 1988, 370 p. (in Russ.).
10. Lopanov A.N. *Vzryvy i vzryvchatye veshhestva* [Explosions and explosives]. Belgorod, Publishing House of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2008, 516 p. (in Russ.).
11. Afanasenkov A.I., Kotova L.I., Kuhib B.N. [On the operability of industrial explosives]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 115-125 (in Russ.).
12. Urazbahtin F.A. *Kriticheskie situacii v processe zhiznennogo cikla tehniceskikh system* [Technical System Lifecycle Critical Situations]. *Sovremennye aspekty komp'juternoj integracii mashinostroitelnogo proizvodstva. Materialy Vserossijskoj nauchno – prakticheskoj konferencii* [Proc. of Modern aspects of computer integration of machine building. Materials of the All-

Russian Scientific and Practical Conference]. Izhevsk, 2003, pp. 6-10 (in Russ.).

13. *Teorija vzryvchatyh veshhestv. Sbornik statej* [Explosive theory. Collection of articles]. Moscow, Voennoe Publ., 1963, 597 p. (in Russ.).

14. Juhanson C.H., Person P.F. *Detonacija vzryvchatyh veshhestv* [Detonation of explosives]. Moscow, Mir Publishing House, 1973, 352 p. (in Russ.).

15. Orlenko L.P. *Fizika vzryva. Tom 2* [Fizika vzryva. Tone 2]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2002, 644 p. (in Russ.).

16. Zhuchenko E.I., Ioffe V.B., Kuhib B.N., Frolov A.B. [Assessment of the relative operability of modern explosive devices]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2007, no. 1/6, pp. 208-213 (in Russ.).

17. Afanasenkov A.I. [On the operability of explosives. Trautzl Method]. *Combustion and explosion physics*, 2004, vol. 40, no.1, pp. 132-139 (in Russ.).

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

19. Zharkov V.V., Psel K.N., Tokarev V.Ju. *Jeksperimental'noe opredelenie sypuchesti suhix stroitel'nyh smesej* [Experimental determination of dry building mixtures looseness]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*, 2013, rel.10, pp.288-297 (in Russ.).

20. Pyzhov A.M., Tarasov A.K., Usenko A.G., Pyzhova T.I., Abramov A.A. *Sposob ocenki sypuchesti poroshkoobraznyh veshhestv i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method for evaluation of powdery substances looseness and device for its implementation]. Patent RF, no. 2541726 C2, 2015.

* * *

Integrated Assessment of Criticality of the Main Energy Carrier in Explosive Stamping of Large Missile Parts

V. F. Urazbakhtin, Engineer, Votkinsk branch of Kalashnikov ISTU, Votkinsk, Russia

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

Industrial explosives are subject to special requirements. Strict compliance with the requirements ensures the design operability of the energy carrier of the blasting process.

Under these conditions, critical situations arise invariably. In the state of criticality in explosives, changes in parameters occur. The changes lead to an atypical process of stamping by explosion and poor-quality production of large-sized missile parts. For example, the criticality associated with reducing the detonation properties of the explosive leads to a change in the shock wave parameters. In this case, the dimensions of the deformed blanks with double curvature are not correct. Incorrect dimensions cannot be corrected by subsequent machining.

The parameters of explosives shall be within the limits for which there is no criticality.

The paper considers the possibility of quantifying the criticality arising from the transition of the explosive from the working to the inoperable state. Each criticality assessment is carried out by the intensity of the development of a separate explosive property. In this mathematical model, the state of the stamping object is estimated by 12 criticality indicators.

The evaluation calculated using a mathematical model allows you to determine the state of the explosive during storage and during stamping with an explosion of a missile part. The value of this estimate can indicate the degree of proximity of the inoperable state.

Keywords: Complex system, industrial explosives, properties, intensity of the property manifestation, states, parameters, indicators of criticality.

Получено: 18.04.2021