

УДК 658.512

**А. Ю. Уразбахтина**, кандидат технических наук, доцент, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

**Ф. А. Уразбахтин**, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

## КРИТИЧЕСКИЕ СИТУАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ КОРПУСОВ РАКЕТ\*

*Построена математическая модель в виде комплекса показателей, оценивающих степени приближения критических ситуаций, возникающих при выполнении сварки деталей корпусов ракет из алюминиево-магниевых сплавов. Показатели входят в математическую модель управления процессом изготовления деталей корпусов ракет.*

**Ключевые слова:** критические ситуации, математическая модель, корпус ракеты, сварка алюминиево-магниевых сплавов.

**В** настоящее время возможности Российской армии существенно зависят от технической оснащенности. Она определяется в первую очередь наличием высокоточной боевой техники, к которой относятся многоступенчатые ракеты, используемые для транспортировки и доставки боевых зарядов различной мощности.

Ракеты являются сложными изделиями, успешная эксплуатация которых напрямую связана с высоким качеством изготовления их узлов, агрегатов и блоков [1]. Это качество предполагает полное и точное выполнение технических требований при изготовлении всех частей изделия. Однако обеспечение изделий совокупностью проявлений свойств установленной интенсивности усложняется из-за многоэлементности и многофункциональности многоступенчатых ракет.

Корпус является основной частью многоступенчатой баллистической ракеты. Он представляет собой конструкцию с продольно расположенными разгонными ступенями, соединенными переходными (соединительными) отсеками с головной частью, либо боевой ступенью, закрытой головным обтекателем [2]. При изготовлении деталей этих частей из алюминиево-магниевых сплавов широкое применение находят токарные операции, а также сборочные операции сварки и клёпки.

В условиях современного производства при изготовлении корпусов ракет помимо обеспечения необходимого качества важным является выполнение технологических операций с минимальными временными затратами.

Для этого необходима количественная оценка качества выполнения данных технологических и сборочных процессов вместе с технико-экономическими характеристиками процесса производства.

Рассмотрим сборочный процесс сварки силовых корпусов ракет из алюминиево-магниевых сплавов.

Сварка алюминиево-магниевых сплавов является сложным процессом, в ходе выполнения которого требуется оптимальное назначение и точное соблюдение параметров сборочного технологического

процесса [4, 5]. При несоблюдении требований к технологическому процессу сборки сваркой считается, что возникли предельные (критические) ситуации. Их оценку осуществляют по дефектам сварочных швов. Степень развития критических ситуаций предлагается оценивать с помощью показателей  $\bar{y}_i$ . Каждый такой показатель нормируется так, что при его значении равном единице (или более) считается, что возникла соответствующая критическая ситуация [6, 7]. Комплекс показателей  $\bar{y}_i$  составляет математическую модель определения степени выполнения требований, предъявляемых к сварным корпусам ракет.

Совместно эти показатели дают общую оценку качества выполнения переходов сборочного процесса сварки [6, 7]:

$$Y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{y}_i, \quad (1)$$

где  $m$  – количество показателей.

Рассмотрим группу таких показателей.

Наиболее часто в процессе сварки алюминиево-магниевых сплавов возникают критические ситуации, развитие которых приводит к появлению дефектов, трещин, окисных плен, непроваров, несплавлений [3, 4, 5]. Оценка критичности будем производить по суммарной длине дефектных участков сварного шва. Эта длина  $\sum L_D$  дефектных участков, подлежащих подварке, согласно техническим требованиям к качеству сварки корпусов деталей ракет не должна превышать заданное значение  $[\sum L_D]$ . Выражение показателя имеет вид

$$\bar{y}_i = \frac{\sum L_D}{[\sum L_D]}. \quad (2)$$

Например, для сварных соединений I категории  $[\sum L_D] = 20\%$  от длины шва (но не более 300 мм)

и  $[\sum L_D] = 30 \%$  для II категории (но не более 400 мм) [3, 4, 5].

Трещины при сварке могут появиться в зоне термического влияния. Само их появление уже является критической ситуацией. Критичность оценивается по шероховатости. Если шероховатость поверхностей свариваемых элементов составляет  $Rz > 40$  мкм [4, 5], то показатель критичности имеет вид

$$\bar{y}_2 = \frac{Rz}{40}. \quad (3)$$

Критические ситуации могут возникнуть также в виде неравномерной плотности сварных швов и несплавлений. Эта критичность вызвана подготовкой сварочных материалов, а именно: длительностью хранения  $T_{x.m}$  перед сваркой основного материала после шабрения; сроком хранения  $T_{xp}$  сварочной проволоки после химического травления и необходимостью предварительного прогрева проволоки в аргоне до  $T = 250...300$  °С. Согласно техническим требованиям  $T_{x.m}$  должна составлять менее 3 ч, а  $T_{xp}$  – менее 8 ч. Важным является обеспечение культуры производства: в местах изготовления деталей корпуса ракеты влажность должна быть не более  $\phi_{max} = 70...85 \%$ , температура – в пределах 16...20 °С для холодного периода и 18...22 °С – для теплого времени года [4, 5]. Критичность, по нашему мнению, наступает, если не соблюдаются технические требования и культура производства. Данные критические ситуации оценим показателями

$$\bar{y}_3 = \frac{T_{x.m}}{3}, \quad \bar{y}_4 = \frac{T_{xp}}{8}, \quad \bar{y}_5 = \frac{\phi}{\phi_{max}}; \quad (4)$$

$$\bar{y}_6 = A_6 + B_6 \tau + C_6 \tau^2, \quad (5)$$

где  $\phi$  и  $\tau$  – фактические влажность (%) и температура на сварочном участке (°С) соответственно;  $\tau_{min}$  и  $\tau_{max}$  равные 16 и 20 °С для холодного периода, 18 и 22 °С – для теплого времени года соответственно; коэффициенты  $A_6, B_6, C_6$  определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_6 + \tau_{min} B_6 + \tau_{min}^2 C_6 &= 1, \\ A_6 + \tau_{max} B_6 + \tau_{max}^2 C_6 &= 1, \\ A_6 + B_6 \frac{(\tau_{min} + \tau_{max})}{2} + C_6 \frac{(\tau_{min} + \tau_{max})^2}{4} &= 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В процессе плазменной сварки деталей из алюминивно-магниевого сплава сжимающее дугу сопло, через которое проходит плазма, характеризуется диаметром выходного отверстия  $d_C$  и длиной  $l_C$ . Безаварийный режим работы горелки достигается при значении длины  $l_C$ , находящемся в диапазоне 0,5...2,0  $d_C$ . В противном случае критическая ситуация в работе горелки приведет к двойному дугообразованию (дуга возникнет между электродом, соплом

и изделием одновременно) [4, 5]. Эту ситуацию будем оценивать показателем

$$\bar{y}_7 = A_7 + B_7 K_{ld} + C_7 K_{ld}^2, \quad (7)$$

где  $K_{ld} = l_C / d_C$ . Коэффициенты  $A_7, B_7, C_7$  определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_7 + 0,5B_7 + 0,5^2 C_7 &= 1, \\ A_7 + 2B_7 + 2^2 C_7 &= 1, \\ A_7 + B_7 \frac{(0,5+2)}{2} + C_7 \frac{(0,5+2)^2}{4} &= 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Качество сварного шва определяется системой коэффициентов [4, 5]. Рассмотрим их.

Коэффициент формы шва – отношение ширины шва  $e$  к его толщине  $t$  [4, 5]:

$$K_n = e/t. \quad (9)$$

Значение этого коэффициента должно находиться в интервале от 0,5 до 4, причем оптимальным является значение от 1,2 до 2 [4, 5]. В противном случае считается, что возникла критическая ситуация, связанная с неудовлетворительной формой шва. Ее будем оценивать показателем

$$\bar{y}_8 = A_8 + B_8 K_n + C_8 K_n^2, \quad (10)$$

в котором коэффициенты  $A_8, B_8, C_8$  являются корнями системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_8 + 0,5B_8 + 0,5^2 C_8 &= 1, \\ A_8 + 4B_8 + 4^2 C_8 &= 1, \\ A_8 + B_8 \frac{(0,5+4)}{2} + C_8 \frac{(0,5+4)^2}{4} &= 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

За коэффициент выпуклости шва принимается отношение ширины шва  $e$  к его выпуклости  $q$  [4, 5]:

$$K_y = e/q. \quad (12)$$

Значение этого коэффициента не должно быть более 7...10 [4, 5]. В противном случае считается, что появятся трещины, т. е. наступит критическая ситуация. Оценивать вероятность возникновения этой критичности будем показателем

$$\bar{y}_9 = \frac{K_y}{10}. \quad (13)$$

Коэффициент, оценивающий долю основного металла в шве, имеет вид [4, 5]

$$K_0 = F_0 / (F_0 + F_3), \quad (14)$$

где  $F_0$  – площадь сечения расплавленного основного металла;  $F_3$  – площадь сечения наплавленного электродного металла. При низкой доле содержания основного металла в шве имеет место критическая ситуация, которая проявляется в виде низкой плотности и пластичности сварного соединения. Оценивать данную критичность будем показателем

$$\bar{y}_{10} = \frac{[K_o]_{\min}}{K_o}, \quad (15)$$

где  $[K_o]_{\min}$  – минимально необходимая доля основного металла в металле шва.

При выполнении дуговой сварки алюминий-магниевого сплава (с содержанием магния до 5 %) сплавов электродами с покрытием необходим подогрев мест соединения деталей до 100...400 °С в зависимости от их толщины [4, 5]. В противном случае наступит критическая ситуация, развитие которой приведет к недостаточной коррозионной стойкости сварного шва. Степень критичности такой ситуации будем оценивать выражением

$$\bar{y}_{11} = \frac{T_P}{T_N}, \quad (16)$$

где  $T_P$ ,  $T_N$  – фактическая и необходимая температуры подогрева алюминий-магниевого сплава соответственно, °С.

Все эти температуры выбираются в зависимости от толщины свариваемых кромок и марки свариваемого сплава.

При неудачно выбранных режимах сварки и отсутствии фиксирующих приспособлений возникновение критической ситуации связано с отклонением геометрических размеров сварной конструкции от заданных в конструкторской документации значений [3, 4, 5]. Оценку этой критичности предлагаем производить с помощью выражения

$$\bar{y}_{12} = \frac{\delta_F}{\delta_{\min}}, \quad (17)$$

где  $\delta_F$  – фактическое значение отклонения геометрического размера корпуса, мм;  $\delta_{\min}$  – установленный в конструкторской документации допуск на этот геометрический размер корпуса, мм.

Чтобы избежать критической ситуации при сварке деталей с резким перепадом толщины, необходима полка со стороны точеных деталей (фланец, шпангоут и др.), длина которой должна составлять удвоенную толщину стыкуемых деталей в зоне сварки и быть не менее 30 мм [4, 5]. При невыполнении этих условий возникает критическая ситуация, развитие которой приводит к созданию нежесткой сварной конструкции и появлению кристаллизационных трещин. Оценивать критичность будем показателем

$$\bar{y}_{13} = A_{13} + B_{13} L_S + C_{13} L_S^2. \quad (18)$$

Коэффициенты  $A_{13}$ ,  $B_{13}$ ,  $C_{13}$  определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_{13} + 30B_{13} + 30^2 C_{13} &= 1, \\ A_{13} + 2S B_{13} + (2S)^2 C_{13} &= 1, \\ A_{13} + B_{13} \frac{(30+2S)}{2} + C_{13} \frac{(30+2S)^2}{4} &= 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Подведем итоги.

Построена математическая модель, которая позволяет оценивать критичность, возникающую при изготовлении деталей корпусов ракет.

Модель состоит из показателей, которые оценивают критические ситуации, возникающие в процессе изготовления деталей корпусов ракет.

С помощью этой математической модели осуществляется процесс управления технологией сварки деталей корпусов ракет из алюминий-магниевого сплава.

Компьютерная реализация математической модели позволяет проводить текущий контроль качества изготовления корпусных деталей ракет через показатели  $\bar{y}_i$ .

#### Библиографические ссылки

1. Воткинский завод: вчера, сегодня, всегда / под ред. С. М. Проскурина. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 2010. – 200 с.
2. Павлюк Ю. С. Баллистическое проектирование ракет. – Челябинск : Изд-во ЧГТУ, 1996. – 92 с.
2. ГОСТ 30242–97. Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначения и определение.
3. Особенности сварки алюминия и его сплавов. – URL: <http://www.tehnoinfo.ru/jelektricheskajasvarkametallov/54.html>
4. Дефекты при сварке. – URL: [http://www.e-ope.ee/\\_download/euni\\_repository/file/3112/Argoon-kaarkeevitus%20volframelektroodiga%20\(TIG\)%205.zip/51\\_.html](http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/3112/Argoon-kaarkeevitus%20volframelektroodiga%20(TIG)%205.zip/51_.html)
5. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю. Критические ситуации при резке заготовок для штамповки деталей воспламенительного устройства ракетного двигателя // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 4(48). – С. 40–45.
6. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Хмелева А. В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракет : монография / под ред. проф. Ф. А. Уразбахтина. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 408 с.

A. Yu. Urazbakhtina, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch  
F. A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch

#### Critical Situations in Manufacture of Rocket Casing Parts

The paper describes the developed mathematical model as a complex of indices estimating the degrees of approaching critical situation, arising during welding of rocket casing parts made of aluminum-magnesium alloys. Indices are components of the mathematical model of controlling the process of rocket casing part manufacture.

**Key words:** critical situations, mathematical model, rocket casing, welding of aluminum-magnesium alloys.