

УДК 658.512

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

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

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СБОРКЕ КЛЕПКОЙ *

Рассматриваются предельные ситуации, которые могут возникнуть при сборке клепкой корпусов ракет из алюминий-магниевого сплава по прочности, стойкости к коррозии, технологичности и себестоимости выполнения швов; по характеристикам заклепок, оборудования и приспособлений. Предельные ситуации оцениваются специальными показателями с помощью моделирования в среде MathCAD.

Ключевые слова: предельные ситуации, математическая модель, корпус летательного аппарата, клепка деталей из алюминий-магниевого сплава.

Одним из надежных и распространенных способов соединения деталей корпусов ракет из алюминий-магниевого сплава до сих пор остается сборка клепкой. Клепанные соединения обладают достаточной прочностью, успешно сопротивляются значительным вибрационным и переменным нагрузкам. Процессы клепки тонкостенных корпусов из алюминий-магниевого сплава в настоящее время успешно освоены в производстве деталей ракет [1].

Низкое качество и эффективность клепки являются результатами предельных ситуаций в процессе выполнения этого технологического процесса [1]. Это обстоятельство делает необходимым проведение моделирования процесса клепки. Математическая модель процесса клепки представлена в виде конечного множества количественных показателей y_i , каждый из которых оценивает степень приближения к отдельной предельной ситуации. Непосредственно на возникновение i -й предельной ситуации указывает значение показателя, большее единицы. Общая эффективность технологической системы клепки определяется по целевой функции из [2]:

$$Y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \rightarrow \min,$$

где m – общее количество показателей в математической модели.

Каждое состояние технологической системы оценивается значениями параметров, среди которых характеристики формы и клепального инструмента,

диаметр, длина заклепки, диаметр отверстия. Все параметры в математической модели разделены на константы и управляющие переменные. В математической модели используется специальная система кодирования технологических параметров. На основе построенной математической модели разработано программное обеспечение, которое функционирует в среде MathCAD.

К управляющим параметрам технологической системы клепки корпусов из алюминий-магниевого сплава относятся: информационные коды формы типа заклепки – zaa (принято, что 5 – с полукруглой головкой, 6 – с потайной, 7 – составные, с плоским буртиком); материала корпуса – $mks1$ и стержня заклепки – $mks2$ (10 – X18H9; 16 – AlMg5); вида усилий kkz (1 – ударная или 2 – прессовая клепка); оборудования для установки заклепок io (1 – автомат АК-5,5-2,4; 6 – заклепочник Taurus2); приспособления – llo (1 – прижимы, ограничители; 3 – приспособление); оборудования для выполнения отверстий – oio (1 – дрель; 2 – радиально-сверлильный станок). Управляющими параметрами также являются: класс точности заклепки – KTZ (B или C); диаметр – d_3 и длина заклепки – l_{kz} ; расстояние от оси заклепки до края детали – C_3 .

Рассмотрим процесс моделирования клепки приборной платы к шпангоуту корпуса ракеты 18 заклепками (толщина шпангоута в месте клепки – 15 мм; приборной платы – 10 мм). Представим исходные данные для 4 разработанных вариантов (табл. 1). Ход моделирования покажем на листингах, а результаты сведем в табл. 2.

Таблица 1. Управляющие параметры и целевая функция

Управляющие параметры и целевая функция	Значения управляющих параметров и показателей критичности			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Информационный код формы головки и типа заклепки zaa	5	6	9	7
Информационные коды материала корпуса и стержня заклепки $mks1$ и $mks2$	16	16	16	15
	16	16	16	10

© Уразбахтина А. Ю., Уразбахтин Ф. А., 2013

Получено 01.10.13

* Статья написана в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Окончание табл. 1

Управляющие параметры и целевая функция	Значения управляющих параметров и показателей критичности			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Класс точности заклепки <i>KTZ</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
Длина (корпуса) заклепки <i>l_{KZ}</i>	60	50	38	30
Информационный код метода установки заклепки <i>kkz</i>	1	1	2	1
Расстояние от оси заклепки до места скругления детали <i>C₃</i>	18	10	3	3
Информационный код оборудования для клепки <i>io</i>	16	14	22	8
Информационный код приспособления <i>llo</i>	1	6	1	4
Информационный код оборудования для выполнения отверстий <i>oio</i>	1	2	5	4
Диаметр <i>d₃</i> заклепки, мм	24	24	10	5
Целевая функция <i>Y</i>	7,07	5,51	5,239	5,18

Таблица 2. Результаты моделирования

Обозначения показателей	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Обозначения показателей	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
\bar{y}_1	0,000	0,000	0,000	0,36	\bar{y}_9	0,002	0,002	0,009	0,035
\bar{y}_2	0,510	0,510	0,000	0,000	\bar{y}_{10}	0,009	0,009	0,023	0,044
\bar{y}_3	0,761	0,522	0,501	0,500	\bar{y}_{11}	0,001	0,001	0,006	0,022
\bar{y}_4	0,555	0,555	0,993	0,993	\bar{y}_{12}	0,960	0,750	0,789	0,797
\bar{y}_5	0,660	0,66	0,592	0,625	\bar{y}_{13}	0,579	0,000	0,220	0,000
\bar{y}_6	0,505	0,505	0,609	0,551	\bar{y}_{14}	0,300	0,200	0,300	0,100
\bar{y}_7	0,873	0,873	0,364	0,185	\bar{y}_{15}	0,063	0,048	0,120	0,015
\bar{y}_8	0,973	0,556	0,333	0,632	\bar{y}_{16}	0,320	0,320	0,400	0,320

1. Ввод данных:

mks1 := 16	mks2 := 16	Информационные коды материала корпуса и стержня заклепки
	zaa := 5	Информационный код формы головки и типа заклепки
	KTZ := "B"	Класс точности заклепки
	kkz := 1	Информационный код метода установки заклепки (для ударной 1 или прессовой клепки 2).
	C3 := 18mm	Расстояние от оси заклепки до места скругления детали

2. Считаем, что материал заклепки должен соответствовать материалу соединяемых деталей с точки зрения значений электродных потенциалов. В противном случае возникает предельная ситуация. Она связана с возникновением взаимодействия между материалом изделия и корпусом заклепки и возможным появлением коррозии [3]. Степень приближения к предельной ситуации определяется показателем

$$\bar{y}_1 = 1 - k_{PT}, \tag{1}$$

где k_{PT} – коэффициент соответствия значений и знаков электродных потенциалов материалов заклепки и соединяемых деталей. Например, для алюминиевого сплава АМг6 стационарный потенциал равен (-0,5 В), а для нержавеющей стали Х18Н9 – (+0,46 В) [3].

Cp21 := CP_{mks1,1} = -0.5V	Cp22 := CP_{mks2,1} = -0.5V	Стационарный потенциал материалов корпуса и стержня заклепки
$k_{1PT} := \begin{cases} \frac{Cp21}{Cp2} & \text{if } Cp2 > Cp21 \\ \frac{Cp2}{Cp21} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$		Коэффициенты соответствия значений и знаков электродных потенциалов материалов корпуса и стержня заклепки материалу соединяемых деталей
$k_{2PT} := \begin{cases} \frac{Cp22}{Cp2} & \text{if } Cp2 > Cp22 \\ \frac{Cp2}{Cp22} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$	$k_{3PT} := \begin{cases} \frac{Cp22}{Cp21} & \text{if } Cp21 > Cp22 \\ \frac{Cp21}{Cp22} & \text{otherwise} \end{cases} = 1$	
$y_1 := \max[(1 - k_{1PT}), (1 - k_{2PT}), (1 - k_{3PT})] = 0$		

3. Диаметр заклепки d_3 назначается по толщине склепываемых краев деталей. Если на предприятии такие заклепки отсутствуют, то считаем, что возникла предельная ситуация по отсутствию материалов, необходимых для выполнения технологического процесса. Возможность оценки этой предельной ситуации будем определять по значению показателя

$$\bar{y}_2 = A_{48} + B_{48} d_3 + C_{48} d_3^2, \quad (2)$$

$X := \begin{bmatrix} 1 & \frac{d13}{\text{mm}} & \left(\frac{d13}{\text{mm}}\right)^2 \\ 1 & \frac{d23}{\text{mm}} & \left(\frac{d23}{\text{mm}}\right)^2 \\ 1 & \left(\frac{d13 + d23}{2\text{mm}}\right) & \left(\frac{d13 + d23}{2\text{mm}}\right)^2 \end{bmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$	$D48 := \text{Isolve}(X, Y)$	$d3 := \begin{cases} G1_{id,1} & \text{if } zaa = 5 \vee zaa = 6 \vee zaa = 7 = 0.024\text{m} \\ G4_{id,1} & \text{if } zaa = 9 \vee zaa = 10 \vee zaa = 11 \\ G5_{id,1} & \text{if } zaa = 7 \\ 0\text{mm} & \text{otherwise} \end{cases}$
		$y_2 := \begin{cases} A48 + B48 \cdot \frac{d3}{\text{mm}} + C48 \cdot \left(\frac{d3}{\text{mm}}\right)^2 & \text{if } zaa = 5 \vee zaa = 6 = 0.51 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

4. Неудачно подобранная геометрия заклепки и ее частей приведет к появлению предельной ситуации. Например, если корпус заклепки слишком короткий, то возникнет предельная ситуация, связанная с нехваткой материала для формирования замыкающей головки. Оценим эту предельную ситуацию показателем

$$\bar{y}_3 := A_{30} + B_{30} \frac{l_{KZ}}{\min} + C_{30} \left(\frac{l_{KZ}}{\min}\right)^2 = 0,761, \quad (4)$$

где l_{KZ} – длина заклепки, мм; коэффициенты A_{30} , B_{30} , C_{30} находятся из системы уравнений, аналогичной (3), но в которой участвуют предельные значения длин корпуса заклепки из [5] – l_{ZMAX} , l_{ZMIN} .

5. При изготовлении сборок клепкой необходимо обеспечить требуемые зазоры между стержнем заклепки и стенкой отверстия. В противном случае возникает предельная ситуация, которая оценивается показателем

$$\bar{y}_4 := A_{63} + B_{63} \frac{\Delta SZO}{\min} + C_{63} \left(\frac{\Delta SZO}{\min}\right)^2 = 0,555, \quad (5)$$

где коэффициенты A_{63} , B_{63} , C_{63} находятся из системы уравнений аналогичной (3). При этом зазор между стержнем заклепки и стенкой отверстия ΔSZO составляет от 0,1 до 0,4 мм, что обеспечивает хорошее заполнение отверстия [6].

6. Фактические отклонения диаметра стержня δDZA и длины (стержня) заклепки δLZA согласно стандарту не должны превышать определенных значений. В противном случае наступят предельные ситуации, степень приближения которых определяются двумя показателями:

$$\bar{y}_5 := A_{49} + B_{49} \frac{\delta DZA}{\text{micron}} + C_{49} \left(\frac{\delta DZA}{\text{micron}}\right)^2 = 0,66;$$

где коэффициенты A_{48} , B_{48} , C_{48} определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_{48} + d1_3 B_{48} + d1_3^2 C_{48} &= 1 \\ A_{48} + d2_3 B_{48} + d2_3^2 C_{48} &= 1 \\ A_{48} + B_{48} \frac{(d1_3 + d2_3)}{2} + C_{48} \frac{(d1_3 + d2_3)^2}{4} &= 0,5 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $d1_3$, $d2_3$ – предельные значения допускаемых диаметров заклепки, мм.

$$\bar{y}_6 := A_{39} + B_{39} \frac{\delta LZA}{\text{micron}} + C_{39} \left(\frac{\delta LZA}{\text{micron}}\right)^2 = 0,505, \quad (6)$$

где коэффициенты A_{49} , B_{49} , C_{49} , A_{59} , B_{59} , C_{59} определяются из двух систем уравнений, аналогичных (3), с учетом предельных значений отклонений диаметра стержня δ_{DAZ} , δ_{DIZ} и длины заклепки δ_{LAZ} , δ_{LIZ} (мкм).

7. Предельные ситуации, связанные с прочностью клепаного шва, оценим показателями:

$$\bar{y}_7 := \frac{2d_3}{c_3} = 0,873;$$

$$\bar{y}_8 := \frac{C_3}{0,5D_3} = 0,973, \quad (7)$$

где D_3 – диаметр головки заклепки, мм; d_3 – диаметр заклепки, мм; C_3 – расстояние от оси клепаного шва до края профиля детали, мм; c_3 – расстояние от оси клепаного шва до поверхностей, мешающих подводу инструмента, мм [7, 8].

8. Качество соединения при клепке существенно зависит от прочности заклепок [5, 6, 7]. При появлении напряжений в шве возникают предельные ситуации среза или разрыва заклепок, которые можно определить по значениям следующих показателей:

$$\bar{y}_9 := \frac{P_s}{P_{spr}} = 0,002; \quad \bar{y}_{11} := \frac{P_o}{0,45\sigma n \pi \frac{d_3^2}{4}} = 0,00099;$$

$$\bar{y}_{10} := \frac{\sigma CM}{\sigma CM_{pr}} = 0,009, \quad (8)$$

где P_s , P_o – фактические продольные и растягивающие нагрузки на заклепки, Н; P_{spr} – допускаемые нагрузки на заклепку, Н; σCM , σCM_{pr} – фактическое и допускаемое напряжения смятия, Па; n – количе-

ство заклепок; σ_t – предел текучести склепываемого материала, Па.

9. В случае неправильного выбора оборудования для установки заклепки возникает предельная ситуация. Ее оцениваем показателем

$$\bar{y}_{12} = \frac{d_3}{[d_3]}, \quad (9)$$

где d_3 – диаметр заклепки, мм; io – номер строки в реляционной базе данных (БД «ВО») оборудования; $[d_3]$ – наибольший диаметр расклепываемой заклепки, мм, указанный в паспорте оборудования и занесенный в 1-й столбец базы данных.

$$y_{12} := \frac{d_3}{(BO_{io,1}) \cdot 1 \text{ мм}} = 0,96.$$

$BO^{(3)} =$	1	"Автомат сверлильно-клепальный АК-5,5-2,4"
	2	"Молоток массой 200...300 г"
	3	"Молоток массой 350...400 г"
	4	"Молоток массой 400...450 г"
	5	"Молоток массой 450...500 г"
	6	"Заклепочник Taurus 2"
	7	"Заклепочник РН 2-КА"
	8	"Заклепочник SN 2"
	9	"Заклепочник HN 2"
	10	"Заклепочник AccuBird"
	11	"Пневматический клепальный молоток КМП-14-0,25"

10. Выбор оборудования для выполнения клепки зависит не только от диаметра заклепки, но и от габаритов клепаных узлов [6, 7]. В построенной математической модели это учтено показателем

$$\bar{y}_{13} := \begin{cases} \frac{c_3}{(BO_{io,7}) 1 \text{ мм}} & \text{if } 0 \neq (BO_{io,7}) = 0,57895, \end{cases} \quad (10)$$

где c_3 – расстояние от оси клепаного шва до поверхностей, мешающих подводу инструмента, мм; $BO_{io,7}$ – наибольший размер склепываемого узла, допустимого для данной модели оборудования (например, размах скобы, записанный в соответствующем столбце базы данных).

11. При выборе варианта проведения процесса клепки предпочтение отдается стационарному автоматическому оборудованию и в последнюю очередь – ручному механизированному инструменту. Учтем это показателем критичности

$$\bar{y}_{14} := 1 - BO_{io,5} = 0,3, \quad (11)$$

где $BO_{io,5}$ – коэффициент предпочтительности применяемой модели оборудования для выполнения отверстий и клепки (0,1).

12. Технологичность сборки оценивается коэффициентом точности сборки $KtOc$ [1], который прием за показатель критичности

$$\bar{y}_{15} := KtOc = 0,063. \quad (12)$$

13. Экономичность соединения элементов конструкции клепкой оценивается относительной себе-

стоимостью сборки $KoSS$ в расчете на установку 1000 силовых точек соединений [1]. Очевидно, что чем ближе значение $KoSS$ к 100 %, тем ближе появление предельной ситуации по экономичности сборки. Оценим ее приближение показателем

$$\bar{y}_{16} := \frac{KoSS}{100,1} = 0,32. \quad (13)$$

Такова математическая модель, оценивающая критичность технологического процесса клепки.

С использованием этой модели было проведено моделирование 4 вариантов выполнения процесса клепки. Результаты представлены в табл. 2.

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать следующее. Из представленных вариантов наиболее эффективным является четвертый с параметрами: заклепка – алюминий/нерж. сталь с плоским буртиком; диаметр заклепки $d_3 = 5$ мм; дина заклепки $l_{KZ} = 30$ мм; оборудование – заклепочник SN2; специальное сборочное приспособление; сверлильный станок для выполнения отверстий. В этом варианте значение целевой функции наименьшее – $Y_4 = 5,18$.

Подведем итоги.

1. Разработана математическая модель и программное обеспечение в среде *MathCAD*, позволяющие оценивать эффективность технологического процесса клепки корпусных деталей ракет по степени приближения предельных ситуаций.

2. В построенной математической модели эффективность процесса клепки определяется с точки зрения обеспечения качества шва и рационального применения ресурсов предприятия.

Библиографические ссылки

1. Колганов И. М., Дубровский П. В., Архипов А. Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения : учеб. пособие. – Ч. 1. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 148 с.
2. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., Хмелева А. В. Критические ситуации при производстве и технической эксплуатации транспортно-пусковых контейнеров ракет. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 408 с.
3. ГОСТ 9.005–72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами.
4. Справочник технолога-машиностроителя. – Ч. 2 [Электронный ресурс]. – URL: <http://stehmash.narod.ru/stm2str40tab10.htm> (дата обращения: 1.08.2013).
5. Заклепочные соединения и технология клепки [Электронный ресурс]. – URL : <http://ubtec-russia.ru/2012/12/zaklepochnye-soedineniya-i-tekhnologiya-klepki/> (дата обращения: 13.09.2013).
6. Технология авиационного машиностроения [Электронный ресурс]. – URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/3621/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 4.02.2013).
7. Заклепочные соединения [Электронный ресурс]. – URL: http://www.cherch.ru/soedinenie_detaley/zaklepochnie_soedineniya.html (дата обращения: 16.08.2013).
8. Расчет заклепочных соединений [Электронный ресурс]. – URL: http://вфмисс.рф/docs/kaf_opd/prezent/dm/2009/soedineniya.pdf (дата обращения: 15.08.2013).

A. Yu. Urazbakhtina, PhD in Engineering, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

F. A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Program Realization of Mathematical Models of Ultimate Situations Arising at Riveting Assembly

The paper considers the ultimate situations which can arise at riveting assembly of rockets cases made of aluminum-magnesium alloys with account of their durability, resistance to corrosion, technological effectiveness and cost of performance of seams and according to characteristics of rivets, equipment and adjustment devices. Ultimate situations are estimated by special characteristics when modeling within MathCAD system.

Key words: limit situations, mathematical model, aircraft case, riveting of parts made of aluminum-magnesium alloys.

УДК 62-114.003.13

Д. С. Пахомов, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет

А. Б. Чуваков, кандидат технических наук, Павловский филиал Нижегородского государственного технического университета

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Предложена методика решения задач повышения эффективности работы комплекта инструментов путем назначения оптимальных режимов обработки и рационального выбора инструмента под конкретную производственную ситуацию. Рассмотрены конкретные примеры повышения эффективности обработки деталей на многоцелевых станках с ЧПУ.

Ключевые слова: эффективность, оптимизация, производительность, надежность.

Современные технологии ориентированы на обработку детали по возможности на одном многоцелевом станке с ЧПУ. В связи с этим приобретают особую актуальность задачи, связанные с повышением эффективности работы комплекта обрабатываемых инструментов. Решение этих задач может достигаться посредством назначения оптимальных методов и режимов обработки, изменения структуры работы инструментов в наладке, подбора наиболее эффективных обрабатываемых инструментов, посредством оптимального программирования и др.

В настоящее время при назначении режимов обработки деталей на многоцелевых станках с ЧПУ не учитываются многие актуальные в текущий момент времени требования и условия производства, определяющие выбор соответствующего критерия оптимизации. Примеры выбора критерия оптимизации в зависимости от требования и условия производства приведены в табл. 1.

Таблица 1. Примеры выбора критерия оптимизации

Требования и условия производства	Критерий оптимизации
Срочное выполнение заказа	Максимальная производительность
Экономия затрат	Минимум себестоимости
Применение безлюдных технологий	Максимальная надежность процесса

В представленной работе приведено решение задач повышения эффективности операции при использовании одного комплекта инструментов с учетом различных требований и условий производства. Рассмотрим пути повышения эффективности операции на конкретном примере изготовления партии деталей типа корпус. Заготовка – отливка. Материал – СЧ-20. Партия запуска – 40 шт. Оборудование – фрезерно-сверлильно-расточной многоцелевой станок с ЧПУ.

Данные по инструментальной наладке приведены в табл. 2.

Таблица 2. Данные по инструментальной наладке

№ инстр.	Наименование инструмента	Номер и наименование перехода	Материал режущей части	$L_{рез}$	$L_{р.х}$
1	Фреза торцовая Ø 125	№ 1. Фрезерование черновое плоских наружных поверхностей.	ВК8	1420	1590
		№ 2. Фрезерование получистовое тех же поверхностей		1420	1590
2	Сверло Ø10	№ 3. Сверление десяти сквозных отверстий	P6M5	500	540
3	Резец расточной	№ 4. Растачивание отверстия	ВК8	300	304
4	Фреза концевая Ø20	№ 5 Фрезерование двух лысок 20×10	ВК8	60	136
5	Зенковка Ø20	№ 6. Зенкование фасок 1×45° в десяти отверстиях с двух сторон	P6M5	20	100

Обозначения: $L_{рез}$ – длина резания; $L_{р.х}$ – длина рабочего хода.