

УДК 658.512:67.02

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-44-52

Программная реализация модели оценки качества изготовления листовой детали штамповкой

Л. Ф. Уразбахтин, магистрант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор, ВФ ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

На основе анализа критичности построена математическая модель оценки качества листовых деталей из титановых сплавов, рассмотрены особенности оценки качества изготовления тонкостенных и высокоточных деталей из титановых сплавов. Оценка является комплексной, состоит из 14 показателей критичности, объединенных в специальное множество. Каждый из этих показателей характеризует степень выполнения определенного технического требования. В статье рассматриваются особенности оценки качества изготовления тонкостенных и высокоточных деталей из титановых сплавов, широко применяемых в судостроении, авиастроении и ракетно-космической технике. Учитываются сложность геометрии, масштабность размеров и строгие требования к контролю качества на всех этапах производства. Описываются проблемы, возникающие при изготовлении таких деталей, и пути их решения. Предложена технологическая система качества листовой детали (ТС КЛД), обеспечивающая комплексную оценку соответствия изделий установленным нормативным требованиям. Важное внимание уделяется критериям оценки качества, включая геометрические параметры, толщину стенок, точность штамповки и прочностные характеристики, влияющие на эксплуатационные свойства изделия. Рассмотрены методы расчета комплексной оценки на основе объективных параметров, позволяющие минимизировать отклонения от нормативных значений. Разработана многофакторная математическая модель, учитывающая влияние различных производственных факторов на качество деталей. Модель позволяет прогнозировать потенциальные дефекты, оценивать устойчивость параметров и выявлять критические состояния на этапе изготовления. Преимуществом модели является возможность интеграции с автоматизированными системами контроля, что обеспечивает оперативную корректировку технологического процесса в режиме реального времени. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов контроля, повышения точности и надежности изготовления тонкостенных деталей, а также для снижения затрат на обработку дорогостоящих материалов. Внедрение разработанных решений способствует увеличению долговечности и эксплуатационной безопасности изделий, что особенно важно для отраслей с высокими требованиями к качеству и надежности конструкций.

Ключевые слова: штамповка, множество оценок, листовые детали, показатели критичности, титановые сплавы, параметры, оценка качества.

Введение

В машиностроении возникают задачи создания тонкостенных и высокоточных деталей, которые обладают значительными габаритами, сложностью своей конфигурации, изготовлением из труднообрабатываемых и дорогостоящих материалов. Процесс создания таких деталей для судостроительной и ракетно-космической техники всегда сопровождается жестким контролем за качеством их изготовления [1].

Такие детали изготавливаются из титановых сплавов, что обусловлено высокой удельной прочностью материала, хорошей сопротивляемостью агрессивным и высокотемпературным воздействиям внешней среды [2].

Качество изготовления деталей из таких сплавов является интегральным свойством. На практике оно оценивается по соответствию

значений характеристик и параметров детали техническим требованиям, которые отражают конструктивные особенности, механические и технологические свойства используемого материала, в частности состояние рабочих поверхностей рассматриваемой детали.

При изготовлении таких деталей [3] наиболее значимыми являются деформационные свойства материала, на интенсивность проявления которых существенное влияние оказывает действие множества факторов [4].

Это обстоятельство, а также высокая ответственность детали создаваемого изделия требует построение модели определения интегральной оценки качества детали, программно реализуемой на вычислительной технике, с целью оперативного получения действительной информации [5].

Теоретические положения

Качество листовых деталей оценивается по соответствию характеристик технического объекта установленным требованиям. Совокупность этих оценок составляет конечное множество, каждый элемент которого имеет свое физическое содержание.

В таком случае для построения модели комплексной оценки качества листовых деталей, полученных штамповкой, необходимо выделить технологическую систему качества листовой детали (ТСКЛД), полученную штамповкой элементами являются (рис. 1): конструктивные и технологические особенности созданной детали, нормативных требований, а также блок выделения комплексной оценки качества.

Для выполнения операций сравнения получения интегральной оценки качества изготовления детали необходимо предварительно провести формализацию технических требований и представить их в виде множества

$$Z = \{z_i^{\max}, z_i^{\min}, i = \overline{1, m}\}, \quad (1)$$

где z_i^{\max}, z_i^{\min} – максимальные и минимальные значения i -й характеристики, установленной в технических требованиях; m – общее количество технических требований.

Входом в ТС КЛД являются значения характеристик, отражающих состояние ее элементов. Они определяются непосредственным измерением и в совокупности составляют конечное множество

$$X = \{x_i, i = \overline{1, n}\}, \quad (2)$$

где n – количество параметров в ТС КЛД.



Рис. 1. Структура ТС КЛД

Fig. 1. Structure of the TS KLD

Выбор такой структуры ТС КЛД соответствует наличию системных свойств [6]: *целостности*, устанавливающей различие между целым (качество детали) и его составными частями (отдельные стороны качества); *связности*, характеризующей отношения элементов ТС КЛД между собой; *сложности*, отражающей совместимость функционирования элементов ТС КЛД и различное физическое содержание; *эмерджентности*, то есть способности материала де-

тали пластически деформироваться в процессе проявления свойств составными элементами ТС КЛД [7].

Рассматриваемая ТС КЛД содержит составляющие качества деталей из титановых сплавов, полученной разделкой листового проката, на тонкие круглые пластины больших размеров.

В первом элементе ТС КЛД «Конструктивные особенности детали» (рис. 1) содержится конечное множество технических требований – S_1 , связанных с оценкой качества детали, с точки зрения соответствия конструкторской документации геометрических размеров (рис. 2) [8].

При определении множества свойств S_1 предполагалось, что заготовка для деталей отвечает всем требованиям, определенным в технологическом процессе. Она получена разделкой стандартного листа из титанового сплава и затем была подвергнута штамповке [9].

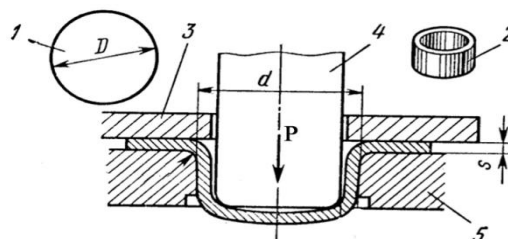


Рис. 2. Изготовление листовой детали штамповкой: 1 – заготовка; 2 – деталь; 3 – прижим; 4 – пуансон; 5 – матрица

Fig. 2. Manufacturing of a sheet metal part by stamping: 1 – blank; 2 – part; 3 – clamp; 4 – punch; 5 – matrix.

Во втором элементе ТС КЛД «Технологические особенности детали» располагаются свойства S_2 , характеризующие технологию изготовления детали штамповкой [10]. Сюда относится в том числе возможное появление гофров, ребер на поверхности детали, изменениях толщины стенок детали [11].

В соответствии с системным подходом [12] предполагаем, что функционирование ТС КЛД состоит в проявлении свойств с интенсивностями $p_{i,j}(X, Z)$ и длительностями $\tau_{i,j}$:

$$S = \{[f(X, Z), p_{i,j}(X, Z); \Delta\tau_{i,j}(X, Z): j = \overline{1, n_i}], i = \overline{1, 2}\},$$

где n_i – количество оцененных свойств в виде технических требований в i -м элементе системы [13].

Анализ функционирования такой ТС КЛД позволяет выделить критичность, связанную с переходом от состояния 1, при котором качество детали является удовлетворительным, к состоянию 2, когда оно неудовлетворительное (рис. 3).

Предполагается, что качество *удовлетворительное*, если все установленные технические требования при создании детали выполнены (состояние 1). В то же время, если хотя бы одно техническое требование не выполнено (не соответствует параметру нормативной технологической документации), тогда качество созданной детали считается *неудовлетворительным* (состояние 2).

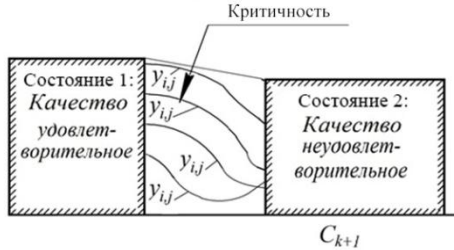


Рис. 3. Структура и критичность ТС КЛД

Fig. 3. Structure and criticality of the TS KLD

В ходе таких переходов состояний возникают неопределенности, так как интенсивности – $p_{i,j}$ и длительности – $\Delta\tau_{i,j}$ проявления свойств зависят от параметров множеств X и Z , имея совершенно другое выражение функциональной зависимости, так как функциональные связи между интенсивностями (длительностями) и параметрами X и Z неисследованы. Они названы нами *критичностями* [14].

В этом случае неясным становится получение оценки качества детали, подверженной критичности по интенсивности, либо длительности проявляемого свойства в ходе функционирования ТС КЛД. Тогда не представляется возможным найти и значения параметров множества X в (2), соответствующих неудовлетворительному качеству. Отсюда затруднено создание и проведение мероприятий по управлению качеством деталей, полученных штамповкой взрывом.

Выявление и управление такими критичностями предлагается проводить с помощью специальной многофакторной математической модели.

Построение многофакторной математической модели состоит в описании поведения ТС КЛД с помощью множества частных показателей критичности $y_{i,j}$. Каждый такой показатель $y_{i,j}$ оценивает критичность, связанную с выполнением отдельного технического требования (свойства).

Оценками такой критичности является результат относительной интенсивности $p_{i,j}$ (либо длительность $\Delta\tau_{i,j}$) с предельными значениями [15]

$$y_{i,j} \leftrightarrow \{p_{i,j}(X, Z), \vee \Delta\tau_{i,j}(X, Z)\}.$$

Оценками критичности элементов ТС КЛД являются два комплекса критичности:

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

где $Y_i = Y_i(y_{i,j}, j=1, \overline{n_i})$.

Предполагая, что все оценки критичности свойств $y_{i,j}$ и комплексов Y_i в ТС КЛД являются равнозначными и безразмерными, имеем (рис. 1)

$$Y_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{i,j}, i=1,2.$$

Интегральной оценкой качества детали, представленной в виде ТС КЛД, принимается оценка критичности, которая находится из выражения

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_2).$$

Частные показатели критичности в математической модели ТС КЛД представлены в безразмерной форме

$$y_{i,j} = \begin{cases} 0,5, & \text{если } G_{i,j} \leq 0,5; \\ 1,0, & \text{если } G_{i,j} \geq 1,0; \\ G_{i,j} & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $G_{i,j} = \varphi_{i,j}(z_k^{\max}, z_k^{\min}, x_k)$ – безразмерная функция критичности j -го свойства в i -м элементе.

В процессе функционирования ТС КЛД каждый частный показатель критичности $y_{i,j}$ принимает определенные значения.

В случае когда значения находятся в интервале менее или равно 0,5, то тогда качество созданной детали по оцениваемому техническому требованию принимается *удовлетворительным*.

При значении частного показателя $y_{i,j}$, равном 1,0, считается невыполненным рассматриваемое техническое требование и, соответственно, неприемлемым качество изготовления детали.

z_k^{\max} , z_k^{\min} и x_k – максимальное, минимальное и действительное значения k -го параметров множеств (1) и (2), с помощью которых определяется интенсивность – $p_{i,j}$ либо длительность – $\Delta\tau_{i,j}$ проявления свойства.

Смысловое содержание параметров z_k^{\max} , z_k^{\min} и x_k в ТС КЛД представлено в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Собственные параметры ТС ДШВ

Table 1. Own parameters of the TS DShV

i	Код параметра	Содержание параметра (расчетного комплекса), размерность	Значение
<i>Собственные параметры элемента «Деталь»</i>			
1	R_M	Внутренний радиус матрицы, м	0,2000
2	R_{HM}	Наружный радиус матрицы, м	0,5000
3	$\rho_{\text{мат}}$	Плотность материала матрицы, г/см ³	7,800
4	ω_s	Частота собственных колебаний матрицы, 1/с	1000,0
5	ρ_M	Плотность материала детали, г/см ³	4,4280
6	δ_0	Толщина заготовки детали, м	0,0030
7	K_c	Коэффициент акустического сопротивления, *100000	6,3000
8	$U_{\text{дв}}$	Скорость движения волн упругой деформации в материале заготовки, м/с	5292,50
9	$V_{\text{заг}}$	Скорость соударения заготовки и матрицы, м/с	335,500
10	J_d	Приведённый импульс давления, КПа*с	584,300
11	$\varepsilon_{\text{заг}}$	Упругая деформация материала детали, %	35,000
12	$a_{\text{гр}}$	Угол наклона зоны двухосного растяжения в детали, град	5,0000
13	$R_{\text{пк}}$	Радиус купольной зоны детали, м	0,2500
14	$\varepsilon_m^{\text{max}}$	Максимальная деформация утонения материала детали, %	2,0000
15	k_r	Коэффициент раздачи	1,0500
16	$H_{\text{п1}}$	Начальная глубина заготовки, м	0,0005
17	$\rho_{\text{нс}}$	Радиус закругления наружных углов поверхности детали, м	0,0030
18	$\rho_{\text{исп}}$	Нормативный радиус закругления наружных углов поверхности детали, м	0,0047
19	σ_T	Предел текучести материала, заготовки, МПа	875,00
20	E_M	Модуль продольной упругости материала заготовки, МПа	115000,0
21	$h_{\text{г1}}$	Высота гофров на детали, м	0,00087
22	b_r	Ширина гофров у основания на детали, м	0,0065

Таблица 2. Параметры критичности листовой детали

Table 2. Criticality parameters of sheet metal parts

N	Код параметра	Содержание параметра критичности	Значение
1	z_1^{max}	Максимальный технологический допуск на диаметр детали, м	0,1000
	z_1^{min}	Минимальный технологический допуск на диаметр детали, м	-0,1000
2	z_2^{max}	Максимальный радиус детали, м	0,2600
	z_2^{min}	Минимальный радиус детали, м	0,2350
3	z_3^{max}	Максимальная толщина стенок детали, м	0,0030
	z_3^{min}	Минимальная толщина стенок детали, м	0,0024
4	z_4^{max}	Максимальная глубина штамповки взрывом в один проход детали, м	0,0300
	z_4^{min}	Минимальная глубина штамповки взрывом в один проход детали, м	0,0010
5	z_5^{max}	Максимальная высота детали, м	0,3450
	z_5^{min}	Минимальная высота детали, м	0,3350
6	z_6^{max}	Максимальное отношение радиуса закругления наружных углов детали к нормативному значению	1,500
	z_6^{min}	Минимальное отношение радиуса закругления наружных углов детали к нормативному значению	0,5000

Окончание табл. 2

N	Код параметра	Содержание параметра критичности	Значение
7	z_7^{\max}	Максимальный относительный радиус закругления вытяжной кромки детали	*5,0000
	z_7^{\min}	Минимальный относительный радиус закругления вытяжной кромки детали	*0,7500
8	z_8^{\max}	Максимальный радиус сопряжения внутренних стенок детали, м	*0,0120
9	z_9^{\min}	Минимальный радиус сопряжения внутренних стенок детали, м	*0,0090
10	z_{10}^{\max}	Максимальное отклонение осевой линии детали, мм	1,0000
	z_{10}^{\min}	Минимальное отклонение осевой линии детали, мм	-1,0000
11	z_{11}^{\max}	Максимальный коэффициент утонения материала детали	1,5000
	z_{11}^{\min}	Минимальный коэффициент утонения материала детали	0,5000
12	z_{12}^{\max}	Максимальное количество гофров на фланце детали	*5
	z_{12}^{\min}	Минимальное количество гофров на фланце детали	*1
13	z_{13}^{\max}	Максимальный угол наклона зоны двухосного растяжения, град	*28,9446
	z_{13}^{\min}	Минимальный угол наклона зоны двухосного растяжения, град	0,0000
14	z_{14}^{\max}	Максимальная относительная высота гофров	*0,2178
	z_{14}^{\min}	Минимальная относительная высота гофров	0,0000

*Рассчитываются в математической модели.

Выражения функций $G_{i,j}$ в (3) для элементов ТСКЛД, характеризующих критичность в частных показателях для листовой детали, полученной штамповкой, в общем случае имеют следующие виды.

Комплекс показателей критичности *первой группы* – Y_1 по свойствам, оценивающим конструкторские особенности детали и матрицы – в ТС КЛД, содержит 5 частных показателей критичности $y_{1,j}$. Они оценивают критичности по выполнению технических требований показателями отклонения радиуса детали – $y_{1,1}$, качества штамповки по радиусу – $y_{1,2}$, по толщине – $y_{1,3}$ и глубине штамповки в один проход – $y_{1,4}$, а также по высоте – $y_{1,5}$.

Например, для частного показателя критичности – $y_{1,1}$ имеет вид

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

где $R_{\pi} = f_1(R_m, \varepsilon_{\text{зач}}, P_m, V_{\text{зач}}, \varepsilon_m); \varepsilon_m =$

$$= j_g / (p_{\text{мат}} * w_s * R_N^2 * l_{\pi} \left(\frac{R_{\text{нм}}}{R_m} \right)).$$

Комплекс показателей второй группы Y_2 ТС КЛД оценивает технологические свойства – S_2 и состоит из 9 частных показателей критичности – $y_{2,j}$ [16].

Эти особенности определяются частными показателями критичности: по закруглениям наружных углов – $y_{2,1}$ и вытяжной кромки детали – $y_{2,2}$, по сопряжению внутренней стенки детали – $y_{2,3}$, по положению осевой линии детали – $y_{2,4}$, утонению материала детали – $y_{2,5}$, по параметрам возникших гофров (количество – $y_{2,6}$, наклон к оси детали – $y_{2,7}$, высота – $y_{2,8}$), а также эксплуатационной прочности материала детали – $y_{2,9}$.

Для всех этих показателей этой группы в общем виде функции критичности имеют вид:

– для первой группы:

$$G_{1,1} = \phi_{1,1}(z_{11}^{\max}, z_{11}^{\min}, z_{11}); \\ G_{1,2} = \phi_{1,2}(z_{12}^{\max}, z_{12}^{\min}, z_{12}); \\ G_{1,3} = \phi_{1,3}(z_{13}^{\max}, z_{13}^{\min}, z_{13}); \\ G_{1,4} = \phi_{1,4}(z_{14}^{\max}, z_{14}^{\min}, z_{14}); \\ G_{1,5} = \phi_{1,5}(z_{15}^{\max}, z_{15}^{\min}, z_{15}); \\ G_{1,6} = \phi_{1,6}(z_{16}^{\max}, z_{16}^{\min}, z_{16});$$

– для второй группы:

$$G_{2,1} = \phi_{2,1}(z_{21}^{\max}, z_{21}^{\min}, z_{21}); \\ G_{2,2} = \phi_{2,2}(z_{22}^{\max}, z_{22}^{\min}, z_{22}); \\ G_{2,3} = \phi_{2,3}(z_{23}^{\max}, z_{23}^{\min}, z_{23}); \\ G_{2,4} = \phi_{2,4}(z_{24}^{\max}, z_{24}^{\min}, z_{24}); \\ G_{2,5} = \phi_{2,5}(z_{25}^{\max}, z_{25}^{\min}, z_{25}); \\ G_{2,6} = \phi_{2,6}(z_{26}^{\max}, z_{26}^{\min}, z_{26});$$

Например, для частного показателя $y_{2,6}$ функция критичности в (3) имеет вид

$$G_{2,5} = 0,5 \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{15} - z_{10}^{\min}}{z_{10}^{\max} - z_{10}^{\min}} \right)^2 \right],$$

где $\varepsilon_{s1} = R_{\text{пк}} \sin \alpha_{gp}$ – радиус зоны двухосного растяжения.

Построенная математическая модель, позволяет получить интегральную оценку качества детали, полученной штамповкой.

Программная реализация математической модели

Модель с помощью вычислительной техники была апробирована на листовых деталях, полученных штамповкой в среде *Deplhi*. Исходные данные представлены в последнем столбце табл. 1 и 2. Скан результатов моделирования представлен на рис. 4.

Деталь представляется в виде стакана, изготовленного из титанового сплава -BT-3, имеет геометрические размеры: диаметр – 0,480 м, толщина – 0,0030 м (рис. 2).

В результате анализа результатов, полученных моделированием, можно утверждать следующее.

1. На первом уровне (деталь в целом) имеет место критичность, но которая допустима при выполнении штамповки. На это указывает значение интегрального показателя качества

$$Y_{\Sigma} = 0,6954.$$

Частные показатели критичности детали после штамповки взрывом разделены на две группы.

В первой группе находятся показатели, которые оценивают критичность с точки зрения геометрических размеров детали. Значение комплексного показателя этой группы – $Y_1 = 0,6239$.

Вторая группа объединяет частные показатели, характеризующие критичность, связанную с технологическими особенностями детали. Значение комплексного показателя критичности той группы оказывается больше – $Y_{6,2} = 0,7352$.

Собственные параметры		Параметры критичности			Показатели критичности	
		Содержание параметра			Название показателя	Значения
		MAX	MIN	NOM	код	
Внутренний радиус матрицы, м.....	0,2000	Технологический допуск на диаметр детали, мм			Y.01. Точность размеров детали	
Наружный радиус матрицы, м.....	0,5000	0,1000	-0,1000	0,0696	Отклонение радиуса детали	Y.01.01 0,7421
Плотность материала матрицы, г/см3.....	7,8000	0,2600	0,2350	0,2400	Качество штамповки по радиусу детали	Y.01.02 0,6800
Частота собственных колебаний матрицы, 1/сек.....	1000,00	0,0030	0,0024	0,0028	Качество штамповки по толщине детали	Y.01.03 0,5556
Плотность материала детали, г/см3.....	4,4280	0,0300	0,0010	0,0112	Глубина штамповки в один проход	Y.01.04 0,5617
Толщина заготовки детали, м.....	0,0030	0,3450	0,3350	0,3420	Качество по высоте детали	Y.01.05 0,5800
Коэффициент акустического сопротивления материала детали*10000.....	6,3000	Отношение радиуса закругления наружных углов детали к нормативному значению			Y.02. Технологические особенности детали	
Скорость движения волны упругой деформации в материале детали, м/сек.....	5292,50	1,5000	0,5000	0,6383	Закругление наружных углов детали	Y.02.01 0,7617
Скорость соударения заготовки и матрицы, м/сек.....	335,500	5,0000	0,7500	1,0000	Закругление выгнутой кромки детали	Y.02.02 0,8893
Приведенный импульс давления, КПа*сек.....	584,3000	0,0120	0,0090	0,0092	Сопрежение внутренних стенок детали	Y.02.03 0,9356
Упругая деформация материала детали, %.....	35,0000	1,0000	-1,0000	0,6800	Положение осевой линии детали, мм	Y.02.04 0,7312
Угол наклона зоны двухосного растяжения, град.....	5,0000	Коэффициент утонения материала детали			Утонение материала детали	Y.02.05 0,7467
Радиус купольной зоны в детали, м.....	0,2500	1,5000	0,5000	1,2024	Наличие гофров на детали	Y.02.06 0,5200
Максимальная деформация утонения материала детали, %.....	2,0000	21	3	14	Наклон ребра гофра детали	Y.02.07 0,5193
Степень раздачи.....	1,0500	Угол наклона зоны двухосного растяжения, град.			Качество гофра по высоте детали	Y.02.08 0,5281
Начальная глубина заготовки, м.....	0,0003	25,4803	0,0000	5,0000	Эксплуатационная прочность материала детали	Y.02.09 0,9848
Радиус закругления наружных углов детали, м.....	0,0030	0,2164	0,0000	0,1338		
Нормативный радиус закругления наружных углов детали, м.....	0,0047				Y.01 = 0,6239 Y.02 = 0,7352	
Предел текучести материала детали, МПа.....	875,000				Y = 0,6954	
Модуль продольной упругости материала детали, МПа.....	115000,0				Критичность первого уровня присутствует. Использование допустимо	
Высота гофров на детали, м.....	0,00087				Критичность второго уровня присутствует. Использование допустимо	
Ширина гофров у основания детали, м.....	0,0065					

Рис. 4. Скан программной реализации моделирования критичности при штамповке листовой детали

Fig. 4. Scan of the software implementation of criticality modeling during sheet metal stamping

Во всех случаях все эти значения показателей критичности приемлемы с точки зрения выполнения технических требований по выполнению штамповки.

На втором уровне критичности, определяемом частными показателями – $y_{2,k}$, разброс значений составляет по первой группе

$$\Delta_1 = (y_{1,k})_{\max} - (y_{j,k})_{\min} = 0,7421 - 0,550 = 0,1871.$$

При этом разброс частных показателей критичности оказался минимальным. У второй группы разброс значений частных показателей составил

$$\Delta_2 = (y_{2,k})_{\max} - (y_{2,k})_{\min} = 0,9848 - 0,5193 = 0,4655.$$

Наименьшая критичность связана с образованием гофров в полученной детали, на что указывают показатели:

- наличие гофров на детали, $y_{2,7} = 0,5193$;
- наклон ребра гофра детали, $y_{2,6} = 0,5200$.

В то же время наибольшая критичность приходится:

- на эксплуатационную прочность материала детали, $y_{2,9} = 0,9848$;
- сопряжение внутренних стенок детали, $y_{2,3} = 0,9356$;

– закругление внутренней кромки стенки детали, $y_{2,2} = 0,8893$.

На эти особенности полученной детали следует обратить внимание при организации изготовления данной детали, а самое главное – при эксплуатации детали в составе изделия.

Программная реализация построенной математической модели позволяет исследовать влияние параметров, входящих в вектор (2), на показатели критичности – $y_{i,j}, Y_1, Y_2, Y_\Sigma$.

Например, влияние толщины стенки детали – δ_0 отражено на рис. 5. Установление зависимости позволяет утверждать, что при увеличении толщины δ_0 возникает недопустимая критичность второго уровня по частному показателю – $y_{2,3}$, который характеризует сопряжение внутренних стенок детали. При этом заметим, на возникновение критичности не указывают показатели – Y_1, Y_2, Y_Σ .

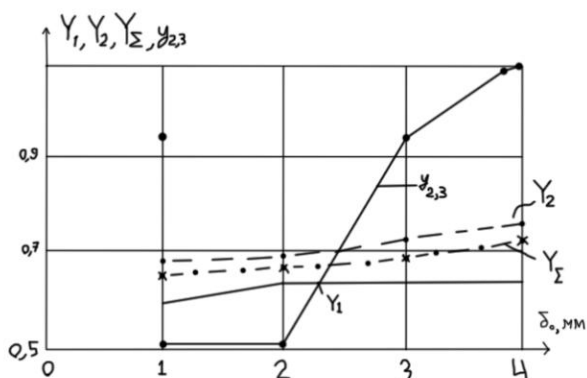


Рис. 5. Влияние толщины стенки детали на показатели критичности

Fig. 5. Effect of wall thickness of the part on criticality indicators

Заключение

1. Выполненный анализ исследований позволяет выдвинуть предположение о недостаточной изученности процессов, связанных с оценкой качества создаваемых крупногабаритных деталей, полученных штамповкой взрывом.

2. Авторами на основе положений теории критичности рассмотрены оценки качества листовых деталей, характеризующие точностные размеры детали и технологические особенности.

3. Предложенный подход позволяет построить математическую модель оценки качества листовых деталей и осуществить прогнозирование состояния качества при выполнении процессов пластического деформирования.

4. Выполненные расчеты с помощью математической модели позволили установить связи между составляющими оценками качества.

5. Представленные теоретические положения могут быть использованы при контроле качества деталей, а также в практике, в ходе возникновения и оценки процессов развития критичностей.

6. Разработанные практические рекомендации нашли применение при изготовлении штамповкой взрывом листовых деталей из титановых сплавов на одном из предприятий страны.

Библиографические ссылки

1. Лаврентьев М. В., Божеева Т. В., МIRONENKO В. В. Конструкторское и технологическое проектирование. Иркутск : Изд-во Иркутского национально-исследовательского технического ун-та, 2023. 266 с.
2. Опыт изготовления штамповок из титановых сплавов в производственных условиях ФГУП «ВИ-АМ» / О. С. Кашапов, Т. В. Павлова, В.С. Калашников, К. Г. Лысов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 1 (136). С. 133–155.
3. Справочник по цветным металлам. URL: <https://metallplaza.ru> (дата обращения: 13.02.2022 г.).
4. Мышечкин А. А., Юсупов В. С., Скрипник С. В. Определение оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки оправки прошивного стана моделированием в программе QFORM // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». 2023. № 21. С. 9–16.
5. Исследование и разработка процесса горячей объемной штамповки изделия из титанового сплава BT22 / М. О. Смирнов, Д. А. Карягин, Д. В. Рынденков, А. В. Пчельников, М. А. Солнцев, А. М. Золотое // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22, № 6. С. 263–270.
6. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтин В. Ф. Интегральная оценка качества заготовки переднего днища ракетного двигателя на твердом топливе из титанового сплава для штамповки взрывом // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 3. С. 148–156.
7. Панфилов Г. В., Черняев А. В., До А. Т. Моделирование штамповки деталей катушечной формы на оправке // Известия ТГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 137–143.
8. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава BT22M, изготовленных с заключительной деформацией в $(\alpha+\beta)$ и β -областях / Е. Н. Каблов, С. В. Путырский, А. Л. Яковлев, В. А. Крохина, С. А. Наприенко // Титан. 2021. № 1 (70). С. 26–33.
9. Гаранина О. Д. Функционирование методологии системного анализа в современной науке: философский анализ // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 73-7. С. 118–122.
10. Пугаев П. В. Комплексное компьютерное моделирование объемной штамповки детали с флан-

цем // Известия Тульского гос. тех. Ун-та. Технические науки, 2024, №2, с.310-312.

11. Чекузов Н. М. Исследование силовых параметров процессов штамповки оребренных плоских деталей // Известия Тульского гос. тех. ун-та. Технические науки. 2021. № 11. С. 471–474.

12. Уразбахтин Ф. А., Уразбахтин В. Ф. Теория критичности применительно к штамповке взрывом. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2024. 272 с.

13. Корчун Ю. Б., Кутенкова Б. Ю. Оптимизация технологического процесса изготовления изделий методом холодной штамповки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. Т. 7, № 3. С. 102–108.

14. Уразбахтин В. Ф., Уразбахтин Ф. А. Интегрированная оценка критичности основного энергоносителя в штамповке взрывом крупногабаритных деталей ракеты. // Интеллектуальные системы в производстве, 2021, № 2, с 104-113.

15. Федорина Е. В., Дьяков И. Ф., Крупенников О. Г. Автоматизация проектирования раскроя металлопроката в заготовительном производстве машиностроительного комплекса // Автоматизация в промышленности. 2023. № 10. С. 20–26.

16. Илларионов А. Г., Попов А. А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2014. 137 с.

References

1. Lavrentiev M.V., Bozhueva T.V., Mironenko V.V. *Konstruktorskoe i tekhnologicheskoe proektirovanie* [Design and technological design]. Irkutsk: Publishing house of the Irkutsk National Research Technical University, 2023, 266 p. (in Russ.).

2. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Lysov. [Experience in the manufacture of stampings from titanium alloys in production conditions of FSUE "VIAM"]. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series Mechanical Engineering*. 2021, no. 1. Pp. 133-155 (in Russ.).

3. Handbook of non-ferrous metals. Available at: <https://metallplaza.ru> (accessed: 02/13/2022).

4. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Skripnik S.V. [Determination of optimal parameters of the process of hot bulk stamping of the mandrel of a piercing mill simulation in the QFORM program]. *Rolling production. Supplement to the journal "Technology of Metals"*, 2023, no. 21, pp. 9-16 (in Russ.).

5. Smirnov M.O., Karyagin D.A., Ryndenkov D.V., Pchel'nikov A.V., Solntsev M.A., Zolotoe A.M. [Research and development of the process of hot bulk stamping of products from titanium alloy VT22]. *Blank production in mechanical engineering*. 2024. Vol. 22. No. 6. Pp. 263-270 (in Russ.).

6. Urazbakhtin F.A., Urazbakhtin V.F. [Integral assessment of the quality of the front end blank of a solid-fuel rocket engine made of titanium alloy for explosive stamping]. *Bulletin of higher educational institutions. Aviation technology*. 2022. No. 3. Pp. 148-156 (in Russ.).

7. Panfilov G.V., Chernyaev A.V., Do A.T. [Modeling of stamping of spool-shaped parts on a mandrel]. *Bulletin of TSU. Technical sciences*, 2021, no. 5, pp. 137-143 (in Russ.).

8. Kablov E.N., Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Krokhiya V.A., Naprienko S.A. [Study of fatigue fracture resistance of stampings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the B ($\alpha+\beta$) and β -regions]. *Titan*. 2021. No. 1. Pp. 26-33 (in Russ.).

9. Garanina O.D. [Functioning of the methodology of systems analysis in modern science: philosophical analysis]. *Trends in the development of science and education*. 2021. No. 73-7, pp. 118-122 (in Russ.).

10. Pugaev P.V. [Integrated computer modeling of volume stamping of a part with a flange]. *Bulletin of the Tula State Tech. University. Technical sciences*, 2024, no. 2, pp. 310-312 (in Russ.).

11. Chekmazov N.M. [Study of the force parameters of stamping processes of ribbed flat parts]. *Bulletin of the Tula State Tech. University. Technical sciences*, 2021, no. 11, pp. 471-474 (in Russ.).

12. Urazbakhtin F.A., Urazbakhtin V.F. [Criticality theory is applicable to explosive stamping]. Moscow, Izhevsk: Institute of Computer Research, 2024. -272s. (in Russ.)

13. Korchun Y.B., Kutenkova B.Y. [Optimization of the technological process of manufacturing products by cold stamping]. *Inter Expo Geo-Siberia*, 2024, v.7, no. 3, pp.102-108 (in Russ.).

14. Urazbakhtin V.F., Urazbakhtin F.A. [Integrated critical characteristic of the main energy carrier in stamping of explosives of large-sized rocket parts]. *Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve*. 2021, vol. 19, no.2, pp.104-113 (in Russ.).

15. Fedorina E.V., Dyakov I.F., Krupennikov O.G. [Automation of design of cutting of rolled metal products in factory production of the machine-building complex]. *Automation in industry*. 2023. No. 10. Pp. 20-26 (in Russ.).

16. Illarionov A.G., Popov A.A., [Technological and economic properties of titanium alloys]. Ekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2014. 137 p. (in Russ.).

Program Implementation for Quality Assessment Model of the Stamped Sheet Part Manufacturing

L. F. Urazbakhtin, Master's Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

F. A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Votkinsk Branch), Izhevsk, Russia

Based on the criticality analysis, a mathematical model to assess the quality of sheet parts from titanium alloys is developed, the features of quality assessment of the manufacture of thin-walled and high-precision parts from titanium alloys are considered. The assessment is comprehensive, consisting of 14 indicators of criticality, united in a special set. Each of these indicators characterizes the degree of meeting of a certain technical requirement. The article discusses the features of quality assessment of the manufacture of thin-walled and high-precision parts from titanium alloys widely used in shipbuilding, aircraft industry and missile and space technique. The complexity of geometry, sizes and strict requirements for quality control at all stages of production are taken into account. The problems arising in the manufacture of such parts and the ways to solve them are described. A technological system of quality of the sheet part (CLD TS) is proposed, providing a comprehensive assessment of the conformity of products with the established regulatory requirements. Important attention is paid to the criteria for quality assessment, including geometric parameters, wall thickness, stamping accuracy and strength characteristics that affect the operational properties of the product. The methods for calculating a comprehensive assessment based on objective parameters are considered, which allow minimizing deviations from normative values. A multifaceted mathematical model has been developed, taking into account the influence of various production factors on the quality of parts. The model allows prediction of potential defects, evaluation of the resistance of parameters and identification of critical states at the manufacturing stage. The advantage of the model is the ability of integration with automated control systems, which ensures the operational adjustment of the technological process in real time. The results of the study can be used to optimize control processes, increase the accuracy and reliability of the manufacture of thin-walled parts, as well as to reduce the cost of processing expensive materials. The introduction of the developed solutions helps increasing the durability and operational safety of products, which is especially important for industries with high requirements for the quality and reliability of structures.

Keywords: stamping, multiple assessments, sheet-metal parts, critical indicators, titanium alloys, parameters, quality assessment.

Получено: 13.02.25

Образец цитирования

Уразбахтин Л. Ф., Уразбахтин Ф. А. Программная реализация модели оценки качества изготовления листовой детали штамповкой // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 2. С. 44–52. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-44-52.

For Citation

Urazbakhtin L.F., Urazbakhtin F.A. [Program Implementation for Quality Assessment Model of the Stamped Sheet Part Manufacturing]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 44-52 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-44-52.