

# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 620.179.16  
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107



## РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ВЫБОРУ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Маркевич А.В.

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Актуальность работы.** Необходимость повышения эффективности и объективности процесса ультразвукового контроля металлопродукции, особенно для случаев дальнейшего производства опасных производственных объектов. Существующие требования и критерии отбраковки к проведению ультразвукового контроля могут привести к субъективности суждений специалиста, принимающего решения о годности металлопродукции, что может приводить либо к пропуску дефектов, либо к неоправданной перебраковке продукции, что резко снижает экономическую эффективность. **Цель исследования.** Разработка научно обоснованного подхода для формирования эффективного и минимально достаточного набора параметров отбраковки при ультразвуковом контроле металлопродукции, обеспечивающего баланс между его строгостью и экономической целесообразностью. **Используемые методы.** В работе применяется построение математической модели, описывающей динамику взаимодействия «потребитель-производитель» и устанавливающей общий уровень строгости контроля на основе анализа стандартов и природы дефектов. Методы анализа иерархий и преобразования матриц используются для трансформации субъективных экспертных оценок в объективную, количественно обоснованную систему взвешивания значимости отдельных критериев ультразвукового контроля. **Новизна.** Разработка и применение комплексного двухэтапного метода, который интегрирует математическое моделирование для обоснования необходимости строгого контроля и объективную оценку критериев с использованием методов преобразования матриц и анализа иерархий. Этот подход позволяет существенно минимизировать субъективные факторы, обеспечивая высокую степень надежности полученных результатов. **Результат.** Создание методики, позволяющей лицу, принимающему решение о годности металлопродукции, перейти от интуитивного назначения параметров отбраковки к количественно обоснованной системе. Данная методика обеспечивает формирование результирующего набора ранжированных критериев, гарантирующего максимальную эффективность контроля при одновременном исключении избыточных параметров. **Практическая значимость.** Внедрение предложенного подхода позволит существенно повысить надежность, объективность и экономическую эффективность операций ультразвукового контроля металлопродукции. Разработанный метод открывает направления для дальнейшего развития, включая его адаптацию к другим видам неразрушающего контроля и создание автоматизированных систем поддержки принятия решений для специалистов в области дефектоскопии.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, математическая модель, S-образная кривая, метод анализа иерархий, преобразование матриц, критерии отбраковки, внутренние несплошности, стандарты контроля

© Маркевич А.В., 2026

### Для цитирования

Маркевич А.В. Разработка подхода к выбору системы критериев для оценки объективности ультразвукового контроля металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# DEVELOPMENT OF THE APPROACH TO THE SELECTION OF CRITERIA SYSTEM TO ASSESS THE OBJECTIVITY OF METAL PRODUCT ULTRASONIC TESTING

Markevich A.V.

PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency and objectivity of the ultrasonic testing process of metal products, especially in cases of further manufacturing of hazardous industrial facilities. The existing requirements and rejection criteria for ultrasonic testing can lead to the judgments subjectivity of the specialist who makes decisions about the suitability of metal products, which can cause either the omission of defects or unjustified product rejection, which dramatically reduces economic efficiency. **Objectives.** The study is aimed at developing a scientifically based approach for the formation of an effective and minimally sufficient set of rejection parameters in ultrasonic testing of metal products, ensuring a balance between its rigor and economic feasibility. **Methods Applied.** The paper involves the construction of a mathematical model describing the dynamics of consumer-manufacturer interaction and establishing a general level of control rigor based on an analysis of standards and the nature of defects. Hierarchy analysis and matrix transformation methods are used to transform subjective expert assessments into an objective, quantitatively substantiated system for weighing the significance of individual ultrasonic testing criteria. **Originality.** The paper describes the development and application of a comprehensive two-stage method that integrates mathematical modeling to justify the need for strict control and objective evaluation of criteria using matrix transformation and hierarchy analysis methods. This approach makes it possible to significantly minimize subjective factors, ensuring a high degree of reliability of the results obtained. **Result.** A methodology that allows a person making the decision on the suitability of metal products to move from an intuitive assignment of rejection parameters to a quantitatively justified system has been created. This method provides the formation of a resulting set of ranked criteria that guarantees maximum control efficiency while simultaneously eliminating redundant parameters. **Practical Relevance.** The implementation of the proposed approach will significantly improve the reliability, objectivity and economic efficiency of ultrasonic testing of metal products. The developed method opens up areas for further development, including its adaptation to other types of non-destructive testing and the creation of automated decision support systems for flaw detection specialists.

**Keywords:** ultrasonic control, mathematical model, S-curve, hierarchy analysis method, matrix transformation, rejection criteria, internal discontinuities, standards of control

## For citation

Markevich A.V. Development of the Approach to the Selection of Criteria System to Assess the Objectivity of Metal Product Ultrasonic Testing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-100-107>

## Введение

Для повышения надежности опасных производственных объектов и увеличения срока службы технологического оборудования необходимо обеспечить высокое качество металлопродукции. Конкуренентоспособность металлургических предприятий, особенно в условиях санкций и импортозамещения, напрямую зависит от качества выпускаемой продукции. Это требует внедрения, использования и совершенствования технологий и методов контроля качества [1].

Ультразвуковой контроль (УЗК) является основным методом обеспечения качества металлопродукции, используемой для производства опасных объектов. Эффективность УЗК определяется двумя ключевыми факторами: соответствием стандартам (ГОСТ, ISO, ASTM) и корректной интерпретацией результатов оператором с учетом возможных дефектов. В современной практике могут использоваться или очень

строгие, или не всегда эффективные нормативы, которые могут привести как к пропуску опасных дефектов, так и к необоснованной отсортировке качественных изделий [2-5].

С развитием технологий Индустрии 4.0 автоматизация и цифровизация производственных процессов становятся все более актуальными. Современные методы контроля значительно повышают точность диагностики и интегрируют информацию о дефектах в комплексную систему управления производством. Это открывает новые возможности для совершенствования производственных процессов, что способствует повышению их эффективности и устойчивости [6, 7].

Еще в 1970-х годах был разработан методологический аппарат для оценки достоверности результатов неразрушающих методов контроля, который позволяет проводить сравнительный анализ с эталонными, чаще всего разрушающими, методами. Данный

инструментарий способствует более точной классификации дефектов на категории «годные» и «негодные», что, в свою очередь, минимизирует вероятность как перебраковки, так и недобраковки. Анализ показателей достоверности позволяет выявить экономическую целесообразность применения многократного контроля с использованием одного метода, а также определить перспективы повышения точности выявления дефектов посредством интеграции нескольких методов неразрушающего контроля [8-10].

Принятие решений и выбор альтернатив – это одна из самых распространенных задач, с которыми сталкивается человек в любой профессиональной сфере, неразрушающий контроль не исключение. Независимо от области, на того, кто принимает решение, ложится значительная ответственность за обоснованность и рациональность этого выбора, даже в условиях неполной или неопределенной информации. Создание моделей, имитирующих человеческие рассуждения, в настоящее время является одной из ключевых задач современной науки [11].

Целью данного исследования является разработка подхода, позволяющего комплексно решить задачу формирования эффективного и минимально достаточного набора критериев отбраковки при проведении ультразвукового контроля металлопродукции.

#### Материалы и методы исследования

Взаимодействие между производителем и потребителем в части приемки продукции по результатам УЗК носит нелинейный характер. Производитель заинтересован в минимизации брака, потребитель – в максимизации надежности. Компромисс достигается на основе требований стандартов, но их применение зависит от уровня «строгости» и ожидания сторон.

После анализа существующих стандартов на ультразвуковой контроль определили, что некоторые из наиболее распространенных критериев отбраковки следующие: размер дефекта – определяет максимально допустимый размер дефекта, который может быть обнаружен при неразрушающем контроле; форма и тип дефекта – описывает форму и классифицирует дефекты по их типу, которая считается неприемлемой (плоскостные дефекты, такие как трещина считаются недопустимым дефектом в отличие от объемных дефектов, которые могут быть допустимыми); расположение дефекта – указывает на расположение дефекта, которое считается опасным или нежелательным. Например, несплошность, расположенная в кромочных зонах, может быть более критичной, чем дефект в центральной части изделия; количество дефектов – устанавливает максимальное количество дефектов, которые могут присутствовать в изделии.

Также необходимо учитывать специфические требования заказчика. Для некоторых проектов могут существовать дополнительные требования к качеству продукции, которые также должны учитываться.

За основу берется классическая S-образная (логистическая) кривая, которая описывает процессы насыщения. В нашем случае по оси X откладывается уровень строгости и ожидание от контроля (максимально допустимая условная площадь несплошности). По оси Y откладывается вероятный риск для потребителя и производителя.

*Потребитель:* кривая начинается с низкой вероятности риска при низком значении максимально допустимой условной площади несплошности и возрастает при достижении высоких уровней максимально допустимых условных площадей несплошности, демонстрируя S-образную форму.

Математически кривую можно описать логистическим уравнением:

$$R = \frac{100}{1 + e^{-k(x-x_0)}}, \quad (1)$$

где  $R$  – вероятность риска для потребителя или производителя;  $x$  – текущий уровень строгости контроля (максимально допустимая условная площадь несплошности);  $x_0$  – уровень строгости, при котором вероятность риска равна 50% (точка перегиба). Этот параметр критически зависит от типа продукции и рисков, связанных с внутренними несплошностями;  $k$  – коэффициент, определяющий крутизну кривой, он характеризует «гибкость» стороны. Высокий  $k$  означает резкий переход от браковки к приемке (жесткая позиция), низкий  $k$  – более плавный, компромиссный подход.

После нескольких итераций оптимальными параметрами являются:  $k = 0,002$  (параметр крутизны),  $x_0 = 2000$  (точка перегиба).

Эта функция хорошо описывает процесс с медленным начальным ростом, быстрым ростом в средней части и замедлением при приближении к максимальному значению (рис. 1).

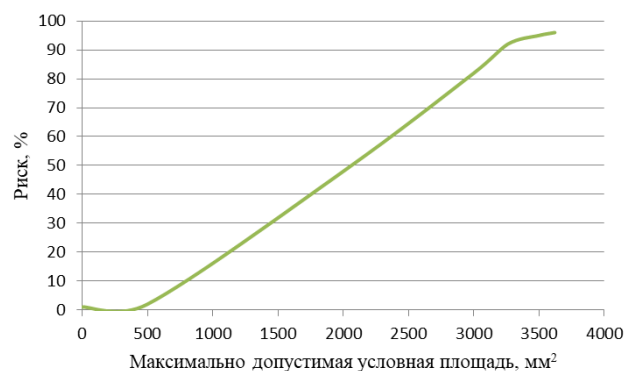


Рис. 1. Распределение рисков для потребителя  
Fig. 1. Distribution of risks for the customer

*Производитель:* кривая начинается с высокой вероятности риска даже при низкой строгости и плавно снижается по мере увеличения максимально допустимой условной площади несплошности, демонстрируя медленный спад вначале, затем резкий переход и снова возрастание.

Модель распределения риска производителя будет хорошо описывать полиномиальная функция второй степени, так как при низких значениях максимально допустимой условной площади есть вероятность перебраковки, и риски у производителя достаточно большие. Затем при увеличении значений максимально допустимой условной площади риски возрастают, появляется вероятность недобраковки (рис. 2).

$$R \approx 0,000011x^2 - 0,032x + 100,2. \quad (2)$$

Для данной модели коэффициент детерминации составляет 0,91, коэффициент корреляции – 0,95.

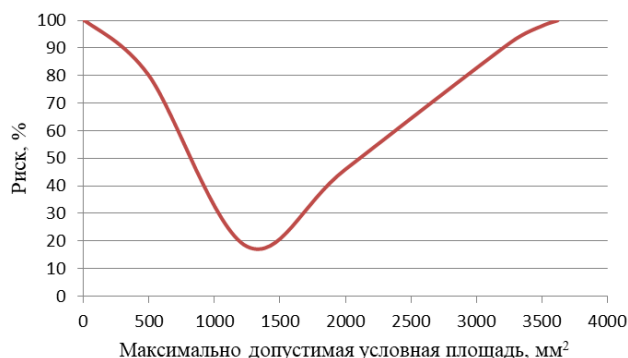


Рис. 2. Распределение рисков для производителя  
Fig. 2. Distribution of risks for the manufacturer

Объединив две модели в один график (рис. 3), видна зависимость между риском производителя и потребителя. Ужесточение контроля и снижение рисков потребителя ведет к росту риска у производителя при низких значениях максимально допустимой условной площади несплошностей. Это ставит большой вопрос в экономической целесообразности выполнять такие заказы. Становится видно, в каких пределах значений несплошностей следует искать компромисс, где оба риска находятся на приемлемом для сторон уровне.

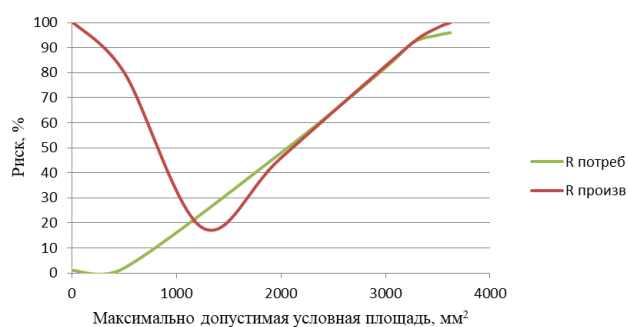


Рис. 3. Распределение рисков для потребителя и производителя  
Fig. 3. Distribution of risks for the customer and the manufacturer

### Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа критериев отбраковки при проведении ультразвукового контроля по существующим

стандартам и определения их важности применили следующие методы: преобразования матриц, анализа иерархий.

**Применение метода преобразования матриц.** Данный метод использовали для определения значимости критерия и выбора необходимого количества критериев для обеспечения надежности результатов неразрушающего контроля. Он позволяет систематизировать информацию о критериях и их важности, а также помогает выявить наиболее значимые критерии для обеспечения надёжности результатов неразрушающего контроля.

Первоначально были определены все возможные критерии, которые могут быть использованы для оценки надёжности результатов неразрушающего контроля. Это могут быть такие критерии, как размер дефекта, форма дефекта, расположение дефекта, количество дефектов, тип дефекта и т. д.

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – множество всех возможных критериев, где  $n$  – общее количество критериев.

Затем оценили важность каждого критерия. Для этого можно использовать шкалу от 1 до 10, где 1 означает наименьшую важность, а 10 – наибольшую важность. После этого составили матрицу, в которой каждый столбец будет представлять один критерий, а каждая строка – оценку важности этого критерия (табл. 1).

Для каждого критерия  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) оценивается его важность / весовой коэффициент ( $w_i$  по шкале от 1 до 10, результаты формируют матрицу важности  $W$ ),  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ .

Таблица 1. Оценка важности критериев  
Table 1. Assessment of the criteria significance

№ п/п	Критерий	Оценка важности
1	Минимальная учитываемая условная площадь несплошностей	10
2	Максимальная допустимая условная площадь несплошностей	10
3	Условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей	9
4	Относительная условная площадь (%), определяемая долей площади с несплошностями всех видов на квадратном участке площадью 1 м <sup>2</sup> , или долей площади, занимаемой несплошностями на всей площади единицы продукции	8
5	Максимально допустимая условная протяжённость несплошностей	7
6	Минимально учитываемый эквивалентный размер несплошности	7
7	Максимально допустимый эквивалентный размер несплошности	9
8	Число непротяжённых несплошностей с эквивалентным размером	6
9	Минимальное расстояние между условными границами несплошностей	7
10	Число несплошностей на всей площади листового проката	9

Далее преобразовали матрицу так, чтобы она отражала относительную значимость каждого критерия. Для этого нужно умножить каждую ячейку матрицы на её оценку важности и сложить все значения в каждой строке. Затем нужно разделить каждое значение в строке на сумму значений в этой строке, чтобы получить относительную значимость каждого критерия.

Нормализация важности критериев: для получения относительной значимости каждого критерия  $s_i$  необходимо нормализовать значения  $w_i$ :

$$s_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad (3)$$

где  $\sum_{j=1}^n w_j$  – сумма всех оценок важности.

Формирование матрицы относительной значимости  $S$ :  $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ .

После преобразования матрицы (табл. 2) выбрали количество критериев, которые будут использоваться для оценки надёжности результатов неразрушающего контроля.

Таблица 2. Преобразованная матрица  
Table 2. Transformed matrix

Критерий	Тело			Кромка		
	Весовой коэффициент	Общая значимость	Относительная значимость	Весовой коэффициент	Общая значимость	Относительная значимость
$C_1$	3	30	0,3	3	30	0,3
$C_2$	3	30	0,3	3	30	0,3
$C_3$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_4$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_5$	1	7	0,07	3	30	0,3
$C_6$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_7$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_8$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_9$	1	7	0,07	1	7	0,07
$C_{10}$	1	7	0,07	1	7	0,07

На данном этапе производили сортировку критериев – критерии сортировали по убыванию их относительной значимости  $s_i$ :  $s_1 > s_2 > s_3 > \dots > s_n$ .

Далее произвели выбор критериев, выбираются первые критерии с наибольшей относительной значимостью:  $s_1 > s_2 > s_3 > \dots > s_n \Rightarrow \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$ .

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наиболее важными критериями для обеспечения надёжности результатов контроля являются (для тела листа):

- максимальная допустимая условная площадь несплошностей;

- условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей.

Для кромки листа:

- максимальная допустимая условная площадь несплошностей;

- условная площадь максимально допустимой зоны несплошностей;

- максимальная допустимая условная протяжённость несплошностей.

Эти критерии имеют наибольшую общую значимость и должны быть приоритетными при разработке стратегии контроля, определении приоритетов в оценке качества продукции и оптимизации процесса контроля.

Таким образом, результаты анализа позволяют определить приоритеты в выборе критериев для обеспечения надёжности результатов неразрушающего контроля.

**Применение метода анализа иерархий.** Для разработки взяли такие же критерии, как в предыдущем методе. Размер матрицы равен  $10 \times 10$ . Была выбрана группа экспертов, задачей которых являлось заполнение матрицы взаимосвязи выбранных критериев (табл. 3). Градация [0; 0,2; 0,5; 0,8; 1], где 0 – нет связи, 0,2 – слабое влияние, 0,5 – среднее влияние, 0,8 – высокое влияние, 1 – полная взаимосвязь.

Таблица 3. Исходная матрица  
Table 3. Initial matrix

Критерии	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
$C_1$	1	0,2	0,2	1	0,5	1	0,2	0,2	0,5	0,2
$C_2$	0,8	1	0,5	0,2	0,5	0,8	1	0,2	0,5	0,2
$C_3$	1	0,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2
$C_4$	1	0,8	0,8	1	0	0,2	0,2	0,2	1	0,8
$C_5$	0,8	0,8	0,5	0,2	1	0,8	0,8	0	0,2	0,8
$C_6$	1	0,5	0,2	0,2	0,5	1	0,5	0,2	0,5	0,2
$C_7$	0,8	1	0,2	0,2	0,5	0,8	1	0,8	0,2	0,2
$C_8$	0,8	0,2	0,5	0,2	0,5	0,8	0,2	1	0,8	0,8
$C_9$	0,5	0,2	0,8	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	1	0,2
$C_{10}$	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	0,5	0,2	0,8	0,8	1

Затем осуществили преобразование матрицы в нечеткую. Исходные экспертные оценки содержат субъективные суждения о влиянии критериев. Нечеткая логика позволяет: учесть неопределенность и неточность человеческих оценок, превратить дискретные значения (0, 0,2, 0,5 и т.д.) в интервальные (тройки чисел), смягчить резкие границы между категориями влияния.

Это необходимо для того, чтобы перейти от бинарных («есть влияние/нет влияния») к более гибким оценкам, отражающим реальную степень взаимосвязи критериев.

Правило преобразования:  $0 \rightarrow (0, 0, 0)$ ;  $0,2 \rightarrow (0,1, 0,2, 0,3)$ ;  $0,5 \rightarrow (0,4, 0,5, 0,6)$ ;  $0,8 \rightarrow (0,7, 0,8, 0,9)$ ;  $1 \rightarrow (1, 1, 1)$ .

Следующим этапом определили значимость каждого критерия с учетом всех его взаимосвязей с другими критериями. Это необходимо для того, чтобы получить объективные весовые коэффициенты критериев (табл. 4).

Для каждого критерия  $C_i$  вычисляется геометрическое среднее его влияния.

$$\tilde{\omega}_i = \left( \prod_{j=1}^{10} \tilde{a}_{ij} \right)^{1/10}. \quad (4)$$

Затем произвели разложение по  $l, m, u$ :

$$\tilde{\omega}_i = \left( \prod_{j=1}^{10} l_{ij} \right)^{1/10}, \left( \prod_{j=1}^{10} m_{ij} \right)^{1/10}, \left( \prod_{j=1}^{10} u_{ij} \right)^{1/10}. \quad (5)$$

Таблица 4. Нечеткие весовые коэффициенты  
Table 4. Fuzzy weighting factors

Нечеткий вес $\tilde{\omega}_i$	Значение
$\tilde{\omega}_1$	(0,16; 0,38; 0,55)
$\tilde{\omega}_2$	(0,28; 0,48; 0,65)
$\tilde{\omega}_3$	(0,18; 0,35; 0,50)
$\tilde{\omega}_4$	(0,28; 0,43; 0,56)
$\tilde{\omega}_5$	(0,30; 0,45; 0,58)
$\tilde{\omega}_6$	(0,16; 0,32; 0,45)
$\tilde{\omega}_7$	(0,23; 0,38; 0,52)
$\tilde{\omega}_8$	(0,26; 0,45; 0,62)
$\tilde{\omega}_9$	(0,29; 0,48; 0,65)
$\tilde{\omega}_{10}$	(0,29; 0,48; 0,65)

Затем производили преобразование нечетких интервальных оценок в конкретные числовые значения, приведение весовых коэффициентов к единой шкале (сумма равна 1).

Это необходимо для того, чтобы сравнивать критерии между собой, использовать весовые коэффициенты в практических расчетах (например, при интегральной оценке качества), принимать обоснованные решения на основе четких числовых данных.

$$\omega_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3}. \quad (6)$$

Формула для нормализации:

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{10} \omega_i}. \quad (7)$$

Числовые данные  $\omega_i$  и  $W_i$ :

$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$	$\omega_8$	$\omega_9$	$\omega_{10}$
0,36	0,47	0,34	0,42	0,44	0,31	0,38	0,44	0,47	0,47
$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$	$W_9$	$W_{10}$
0,088	0,115	0,083	0,102	0,107	0,076	0,093	0,107	0,115	0,115

Проверка суммы нормализованных весовых коэффициентов:  $\sum W_i = 0,088 + 0,115 + 0,083 + 0,102 + 0,107 + 0,076 + 0,093 + 0,107 + 0,115 + 0,115 = 1,00$  (100%).

Далее произвели оценку, насколько непротиворечивы были экспертные мнения, можно ли доверять полученным результатам. Это необходимо для того, чтобы обнаружить и устранить логические противоречия в матрице.

Умножаем матрицу на вектор (то есть произведение матрицы  $A$  на вектор  $W$ ): для каждой строки  $i$ :  $(AW)_i = \sum (a_{ij} \times w_j)$  для  $j$  от 1 до 10.

Критерий	AW	W	AW/W
$C_1$	0,480	0,088	5,45
$C_2$	0,540	0,115	4,70
$C_3$	0,430	0,083	5,18
$C_4$	0,520	0,102	5,10
$C_5$	0,530	0,107	4,95
$C_6$	0,410	0,076	5,39
$C_7$	0,490	0,093	5,27
$C_8$	0,530	0,107	4,95
$C_9$	0,540	0,115	4,70
$C_{10}$	0,540	0,115	4,70

$$\lambda_{\max} = 10,45.$$

Затем рассчитали индекс согласованности ИС:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, n = 10, \quad (8)$$

где  $n$  – размер матрицы.

ИС < 0,1 – матрица считается согласованной.

$$ИС = (10,45 - 10) / 9 = 0,05.$$

Отношение согласованности (ОС): ОС = ИС / СИ; для матрицы  $10 \times 10$  случайный индекс СИ = 1,49, тогда ОС = 0,05 / 1,49 = 0,033 (3,3%).

Матрица обладает хорошей согласованностью (ИС < 0,1; ОС < 10%), следовательно, экспертные оценки не содержат существенных противоречий. Результаты могут быть использованы для принятия решений (табл. 5).

Таблица 5. Итоговые весовые коэффициенты критериев

Table 5. Final weighting factors of the criteria

Критерии	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
Весовой коэффициент (нормализованный), %	8,8	11,5	8,3	10,2	10,7	7,6	9,3	10,7	11,5	11,5
Ранг	9	1-2	10	5	3-4	11	7	3-4	1-2	1-2

Наиболее важные критерии:

–  $C_2$  (11,5%): максимальная допустимая условная площадь несплошностей.

–  $C_9$  (11,5%): минимальное расстояние между условными границами одиночных несплошностей.

–  $C_{10}$  (11,5%): число несплошностей на всей площади единицы листового проката.

### Заключение

Построенная модель наглядно демонстрирует нелинейную зависимость между строгостью контроля и результатом приемки, позволяя прогнозировать поведение сторон и обосновывать выбор контрольных параметров, выходя за рамки простого соответствия стандарту.

Применение метода анализа иерархий и преобразования матриц парных сравнений позволяет перейти от субъективных экспертных оценок к объективной,

количественно обоснованной системе взвешивания критериев ультразвукового контроля. Это дает возможность сформировать оптимальный и минимально достаточный набор параметров для отбраковки.

Предложенный подход позволяет комплексно решить задачу повышения эффективности процесса ультразвукового контроля металлопродукции.

Математическая модель дает понимание динамики взаимодействия «потребитель-производитель» и обосновывает общий уровень строгости контроля, учитывая стандарты и природу дефектов.

Метод анализа иерархий предоставляет строгий математический аппарат для определения значимости отдельных критериев отбраковки и формирования результирующего набора, обеспечивающего максимальную эффективность контроля при минимальной избыточности.

Практическая реализация данного подхода позволит повысить объективность, надежность и экономическую эффективность процессов неразрушающего контроля в металлургической и машиностроительной отраслях.

#### Список источников

1. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 103-111.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Xiaolong S. Application of ultrasonic non-destructive testing in industrial pipeline inspection // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 2024, vol. 9(1), pp. 1-16.
4. Fan Z., Bai K., Chen C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 132(9-10), pp. 1-26.
5. Маркевич А.В., Полякова М.А. Применение методов неразрушающего контроля для выявления дефектов горячекатаного металлопроката // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 285-291.
6. Маркевич А.В., Полякова М.А., Конищев А.В. О необходимости количественной оценки достоверности определения внутренних дефектов металлопроката // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 2. С. 30-37. DOI:10.14489/td.2025.02. pp.030-037.
7. Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса / Логунова О.С., Андреев С.М., Гарбар Е.А., Маркевич А.В., Николаев А.А. // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 54-59.
8. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлоконструкций. М.: Металлургия, 1979. 88 с.
9. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. 132 с.
10. Власов И.Э., Иванов В.И. О дефектометрических подходах в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 1998. № 2. С. 41-46.
11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

#### References

1. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Analysis of efficiency of the existing quality assessment system for materials, products, and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):103-111. (in Russ.)
2. Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik* [Nondestructive testing: reference book]. In 7 Volumes. Vol 3. Ultrasonic testing. Moscow: Mashinostroeniye, 2004, 864 p. (In Russ.)
3. Xiaolong S. Application of ultrasonic nondestructive testing in industrial pipeline inspection. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024;9(1):1-16.
4. Fan Z., Bai K., Chen C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;132(9-10):1-26.
5. Markevich A.V., Polyakova M.A. Application of nondestructive testing methods to search the defects of hot rolled steel product. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences]. 2024;3:285-291. (in Russ.)
6. Markevich A.V., Polyakova M.A., Konishchev A.V. About the necessity of quantitative assessment, the validity of the detection of internal defects in rolled metal product. *Kontrol. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2025;28(2):30-37. (in Russ.)
7. Logunova O.S., Andreev S.M., Garbar E.A., Markevich A.V., Nikolaev A.A. Automation of scientific research of flat surface discontinuities: structural solution of a hardware-software complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2020;(1(46)):54-59. (in Russ.)
8. Volchenko V.N. *Veroyatnost i dostovernost otsenki kachestva metallokonstruksiy* [Probability and certainty of metal constructions' quality assessment]. Moscow: Metallugiia, 1979, 88 p. (in Russ.)
9. Konovalov N.N. *Normirovanie defektov i dostovernost nerazrushayushhego kontrolya svarnykh soedineniy* [Standardization of defects and reliability of non-destructive testing of welded joints]. Moscow: State Unitary Enterprise "Scientific and Technical Center for Industrial Safety" Publishing House, 2004, 132 p. (in Russ.)
10. Vlasov I.E., Ivanov V.I. About defectometric approaches in ultrasonic testing. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 1998;(2):41-46. (in Russ.)
11. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Hierarchy analysis technique]. Translated from Eng. by Vachnadze R.G. Moscow: Radio i Svyaz, 1993, 278 p. (in Russ.)

Поступила 13.10.2025; принята к публикации 13.11.2025; опубликована 31.03.2026  
Submitted 13/10/2025; revised 13/11/2025; published 31/03/2026

**Маркевич Артем Валерьевич** – кандидат технических наук, начальник лаборатории дефектоскопии и радиационной безопасности, Центральная лаборатория контроля, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия.  
Email: markevich.av@mmk.ru. ORCID 0009-0008-1518-1162

**Artem V. Markevich** – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Non-Destructive Testing and Radiation Safety, Central Control Laboratory, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.  
Email: markevich.av@mmk.ru. ORCID 0009-0008-1518-1162