

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 4 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://doi.org/10.48081/SMUR2431>

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.  
*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*  
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*  
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD*  
Омарова А.Р., *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/EUZC9755>

**\*A. Zhakupov<sup>1</sup>, A. Zhakupova<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

\*e-mail: [alibek\\_j85@mail.ru](mailto:alibek_j85@mail.ru)

## **INFLUENCE OF DEPENDENCE EQUATION TYPE ON THE ACCURACY OF CORRELATION BETWEEN MAGNETIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL PRODUCTS**

*This article presents the results of the steel products properties research through non-destructive testing, based on the dependence of mechanical properties on magnetic ones. The objective of the research was to increase the accuracy of determining the mechanical properties of steel products in a non-destructive way through the use of a polynomial dependence. The correlations used in this work were obtained using regression analysis in Excel. The reliability of increasing the accuracy of determining mechanical properties through the structure-sensitive parameters of the magnetic hysteresis loop (coercive force, maximum magnetic permeability and residual magnetic induction) using a polynomial dependence is confirmed by experimental data. The output parameters of the regression equations were the basic mechanical properties: tensile strength, yield strength and elongation. The use of a polynomial dependence, compared to a linear one, made it possible to reduce the error in determining the properties of steel products from 4 % to less than 1 %.*

*Keywords: polynomial dependence, non-destructive testing, mechanical properties, regression, error.*

### **Introduction**

The development of magnetic methods for assessing stresses in elements of steel structures is one of the urgent problems of non-destructive testing. A large number of works are devoted to studying the influence of elastic and plastic deformations on the magnetic properties of steels. The most sensitive magnetic properties are the initial  $\mu_a$  and maximum  $\mu_{max}$  magnetic permeabilities, coercive force  $H_c$ , residual induction  $B_0$ , hysteresis losses and others [1-3].

Coercive force is one of the best known structure-sensitive magnetic parameters due to the relative ease of its measurement, regardless of the geometry of the research object [4, 5].

Another parameter of the magnetic hysteresis loop that has a good correlation with mechanical stresses is the residual magnetic induction. Often the deformation dependences of the residual induction are close in appearance to the inverse deformation dependences of the coercive force. Monotonous changes in the residual induction, observed with an increase in the elastic stresses acting on the ferromagnet, make it possible to estimate their magnitude [6, 7].

Due to the fact that many parameters of the limiting hysteresis loop and the magnetization curve are sensitive, including to the stress-strain state, it is possible to establish a correlation between internal stresses and magnetic properties [8]. However, when establishing a regression equation, a linear function is generally used. At the same time, the measurement error for this reason can be more than 10 %. In this regard, in this work, a research was carried out the influence of the function type on the degree of correlation dependence of mechanical properties on magnetic ones, in order to determine the accuracy and reliability of measurements through the use of more approximate complex functions (power, exponential, logarithmic and others) [9–11]. As a comparison, a polynomial dependence was used.

### Materials and research methods

The object of the research were samples of pipe billets made of 09G2S steel, the chemical composition of which is given in Table 1. The chemical composition was determined on a DFS-500 in accordance with GOST 18895-97 «Method of photoelectric spectral analysis».

Table 1 – Chemical composition of pipe billets made of steel 09G2S

Steel	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
09G2S	0,11	0,62	1,45	0,15	0,004	0,004	0,18	-	-	0,17

Measurement of magnetic indicators (coercive force and residual magnetic induction) was carried out on a KIM-2M coercimeter in accordance with GOST 8.268-77 «Measurement technique for determining the static magnetic characteristics of hard magnetic materials» The value of the maximum magnetic permeability was determined by the ratio of the maximum intensity to the maximum magnetization.

To determine the mechanical properties (tensile strength, yield strength, relative elongation), uniaxial tension was used on a WDW-200 tensile testing machine in accordance with GOST 1497-84 «Metals. Tensile test methods».

## Results and discussion

The task was achieved in the following way. At the beginning, the values of the magnetic parameters were determined by measuring the coercive force  $H_c$ , the maximum magnetic permeability  $\mu_{\max}$  and the residual magnetic induction  $B_0$  of ferromagnetic samples. Next, using regression analysis, we determined the coefficients according to a polynomial equation of the form:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2.$$

where  $y$  – mechanical property indicator;

$x_1$  – coercive force value, A/m;

$x_2$  – maximum magnetic permeability value, H/m;

$x_3$  – value of residual magnetic induction, T;

$a_i a_{jk}$  – regression coefficients.

In order to confirm the reliability of the proposed method for determining mechanical properties (tensile strength  $\sigma_B$ , yield strength  $\sigma_T$  and relative elongation  $\delta$ ) and reduce its error according to this dependence, 5 (five) samples were taken from one hardened product made of steel 09G2S, the values of magnetic properties were measured, and then, the actual values of the mechanical properties were determined through a mechanical tensile test. As a result, the following values were obtained (table 2).

Table 2 – Mechanical and magnetic properties values

Sample №	$\sigma_B$ , MPa	$\sigma_T$ , MPa	$\delta$ , %	$H_c$ , A/m	$\mu_{\max}$ H/m	$B_0$ , T
1	720	662	11,2	13,5	620	1,11
2	731	628	12,0	12,3	645	1,05
3	719	582	11,8	12,9	596	0,95
4	688	594	11,1	11,9	682	1,18
5	695	588	11,9	12,9	590	1,13

Next, using the data obtained, according to Table 2, we conducted a regression analysis, obtaining the following dependencies (Table 3):

Table 3 – Correlation dependencies

Linear dependence	$\sigma_B = 433,892077 + 19,862914H_c + 0,359444\mu_{\max} - 185,219939B_0$
	$\sigma_T = -941,287900 + 72,551000H_c + 1,068626\mu_{\max} - 35,895388B_0$
	$\delta = 27,538906 - 0,574766H_c - 0,011632\mu_{\max} - 1,246337B_0$

Polynomial dependence	$\sigma_b = 540,422470 + 0,609844H_c \mu_{\max} - 0,165024\mu_{\max} \text{Вост} - 14,606285H_c^2 - 0,005591\mu_{\max}^2$
	$\sigma_T = -211,011428 + 1,073648H_c \mu_{\max} + 0,183059\mu_{\max} \text{ост} - 24,252918H_c^2 - 0,009936\mu_{\max}^2$
	$\delta = 18,835729 + 0,013212H_c \mu_{\max} + 0,001204\mu_{\max} \text{Вост} - 0,356325H_c^2 - 0,000141\mu_{\max}^2$

To identify the error of the proposed method for determining mechanical properties using a polynomial dependence, the calculated values of tensile strength, yield strength and elongation were compared with the actual values obtained during tensile testing (Table 4).

Table 4 – Error in applying linear and polynomial functions

Parameter	Sample №	Actual values (tensile test)	Calculated by dependencies			
			linear dependence		polynomial dependence	
			value	error, %	value	error, %
$\sigma_b$ , MPa	1	720	719,30	0,097	720,07	0,010
	2	731	715,57	2,111	731,08	0,011
	3	719	728,39	1,306	719,07	0,010
	4	688	696,84	1,285	688,09	0,013
	5	695	692,90	0,302	695,06	0,009
$\sigma_T$ , MPa	1	662	660,85	0,174	661,91	0,014
	2	628	602,66	4,035	627,90	0,016
	3	582	597,42	2,649	581,92	0,014
	4	594	608,52	2,444	593,89	0,019
	5	588	584,55	0,587	587,92	0,014
$\delta$ , %	1	11,2	11,18	0,179	11,11	0,804
	2	12,0	11,66	2,833	11,90	0,833
	3	11,8	12,01	1,780	11,72	0,678
	4	11,1	11,30	1,802	10,99	0,991
	5	11,9	11,85	0,420	11,82	0,672
Error interval, %	-	-	-	0,097-4,035	-	0,010-0,991

As can be seen from the results of Table 4, the determination of mechanical properties using the proposed method minimizes the measurement error and confirms the reliability of the control.

### **Funding information**

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan by the (Grant No. AP13268736 – Non-destructive method for determining the mechanical properties of steel products)

### **Conclusions**

As a result of the research, an increase in the accuracy of determining mechanical properties was achieved by establishing a closer relationship between input and output parameters. Ensuring increased accuracy in determining the mechanical properties of ferromagnetic products was achieved through the use of a polynomial relationship between magnetic and mechanical properties, providing the best approximation of the relationship between dependent and independent variables. At the same time, the measurement error decreased from 4.035 to 0.991 %.

### REFERENCES

1 **Schapova, E. A., Stashkov, A. N., Afanasyev, S. V., Nichipuruk, A. P.** Magnetic properties and the structure of eutectoid steel with different pearlite morphology // *The Physics of Metals and Metallography*. – 8. – 2021. – P. 796–802.

2 **Stashkov, A., Nichipuruk, A., Kuleev, V., Schapova, E.** Magnetic non-destructive testing of residual stresses in low-carbon steels // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1389. – 2019. – P. 012032.

3 **Ryu, K. S., Nahm, S. H., Park, J. S.** A new non-destructive method for estimating the remanent life of a turbine rotor steel by reversible magnetic permeability // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 251. – 2002. – P. 196–201.

4 **Lee, E.W.** Magnetostriction. Reports of progress in physics // *The physical society. University of Southamton*. – 18. – 1955. – P. 184–229.

5 **Buttle, D. J., Moorthy, V., Shaw, B.** Determination of residual stresses by magnetic methods // *Measurement Good Practice Guide*. – 88. – P. 56.

6 **Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G.** Review methods of measuring residual stresses in components // *Material and Design*. – 35. – 2012. – P. 572 – 588.

7 **Perevertov, O.** Detection of spring steel surface decarburization by magnetic hysteresis measurements // *NDT&E International* – 2011. – V. 44. – P. 490–494.

8 **Kikuchi, H.** Feasibility study for nondestructive evaluation of magnetic properties and hardness of two-layered specimens by magnetic single-yoke probe // *NDT&E International* – 2012. – V. 46. – P. 1–6.

9 **Buschow, K. H. J.** *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*. – USA : Springer US, 2004. – 182 p.

10 **Langman, R.** Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // IEEE transactions on magnetics – 1990. – V. 26. – № 4. – P. 1246–1251.

11 **Zhakupov, A., Zhakupova, A., Bogomolov, A.** Dependence of electromagnetic parameters of products from steel 09g2s on their mechanical properties // Bulletin of Toraighyrov University – Energetics. series – № 3. – 2022. – P.304–312.

Accepted for publication on 28.11.23.

*А. Н. Жакупов, А. Т. Жакупова*

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.  
Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.

## **БОЛАТ БҰЙЫМДАРЫНЫҢ МАГНИТТІК ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ КОРРЕЛЯЦИЯ ДӘЛДІГІНЕ ТӘУЕЛДІЛІК ТЕҢДЕУІ ТҮРІНІҢ ӘСЕРІ**

*Мақалада механикалық қасиеттердің магниттік қасиеттерге тәуелділігіне негізделген бұзбайтын бақылау арқылы болат бұйымдарының қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеудің мақсаты полиномды тәуелділікті қолдану арқылы болат өнімдерінің механикалық қасиеттерін бұзбай анықтау дәлдігін арттыру болды. Берілген жұмыста қолданылатын корреляциялық тәуелділіктер Excel-де регрессиялық талдау арқылы алынды. Полиномды тәуелділікті пайдалана отырып, магниттік гистерезис ілмегінің (коэрцитивтік күш, максималды магниттік өткізгіштік және қалдық магниттік индукция) құрылымдық-сезімтал параметрлері есебінен механикалық қасиеттерді анықтау дәлдігін арттырудың дұрыстығы эксперименттік деректермен расталады. Регрессия теңдеулерінің шығыс параметрлері негізгі механикалық қасиеттер болды: беріктік шегі, аққыштық шегі және салыстырмалы ұзарту. Желілік тәуелділікпен салыстырғанда полиномды тәуелділікті қолдану болат өнімдерінің қасиеттерін анықтау қателігін 4 %-дан 1 %-ға дейін төмендетуге мүмкіндік берді.*

*Кілтті сөздер: полиномды тәуелділік, бұзбайтын бақылау, механикалық қасиеттер, регрессия, қателік.*



А. Н. Жақупов<sup>1</sup>, А. Т. Жақупова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Торайғыров университет, Республика Казахстан, г.Павлодар

Принято к изданию 28.11.23.

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА УРАВНЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ НА ТОЧНОСТЬ КОРРЕЛЯЦИИ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*В статье представлены результаты исследования свойств стальных изделий посредством неразрушающего контроля, основанного на зависимости механических свойств от магнитных. Целью исследования было повышение точности определения механических свойств стальной продукции неразрушающим способом за счет использования полиномиальной зависимости. Корреляционные зависимости, использованные в данной работе, были получены с помощью регрессионного анализа в Excel. Достоверность повышения точности определения механических свойств за счет структурно-чувствительных параметров петли магнитного гистерезиса (коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости и остаточной магнитной индукции) с использованием полиномиальной зависимости подтверждена экспериментальными данными. Выходными параметрами уравнений регрессии были основные механические свойства: временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение. Использование полиномиальной зависимости по сравнению с линейной позволило снизить погрешность определения свойств стальной продукции с 4 % до менее 1 %.*

*Ключевые слова: полиномиальная зависимость, неразрушающий контроль, механические свойства, регрессия, погрешность.*

Теруге 28.11.2023 ж. жіберілді. Басуға 29.12.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4175

Сдано в набор 28.11.2023 г. Подписано в печать 29.12.2023 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4175

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)