

УДК 621.777.23

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖАРОПРОЧНОЙ ОСНОВЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

ЗОЛОТАРЕВ Г. А. <sup>1\*</sup>, *аспирант*  
 ШЕЙКО С. П. <sup>2</sup>, *к.т.н, докторант*  
 МИЩЕНКО В. Г. <sup>3</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1\*</sup>Кафедра обработки металлов давлением, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (093) 0292223, e-mail: [zolotarev.gleb@rambler.ru](mailto:zolotarev.gleb@rambler.ru), ORCID ID: 0000-0001-9753-9974

<sup>2</sup>Кафедра обработки металлов давлением, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (093) 0292223, e-mail: [shevko.s@mail.ru](mailto:shevko.s@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-5761-4263

<sup>3</sup>Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, 69600, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 2891207, e-mail: [mishchen@vandex.ua](mailto:mishchen@vandex.ua), ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

**Аннотация.** *Цель.* Прогрессивным материалом для изготовления реакторов может быть биметалл, состоящий из низкоуглеродистой стали в виде протектора с внутренней стороны реактора и жаропрочной основы – с наружной. Необходимо установить закономерности влияния степени легирования на механические свойства опытной стали на верхнем и нижнем пределе содержания легирующих элементов в стали. *Методика.* Анализ влияния углерода, хрома и никеля на механические свойства стали изучали с использованием статистического метода планирования активного эксперимента. В качестве функции отклика принимали предел прочности  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_{0.2}$ . Математическую обработку экспериментальных данных с целью построения математической модели влияния химического состава на свойства стали проводили по методикам с применением регрессионного анализа. Для сокращения числа опытов и предполагая нелинейный характер функций отклика в работе использовали симметричный композиционный план второго порядка. *Результаты.* Рабочие температуры реакторов магнийтермического производства губчатого титана составляют 850...1020 °С, и важно определить влияние выбранного легирующего комплекса на кратковременную прочность при максимальной рабочей температуре с помощью математического планирования эксперимента. Интервалы варьирования факторов выбирали на основании предварительной информации: экспериментальные и литературные данные о влиянии легирующих элементов на свойства хромоникелевых сталей, механические свойства в исходном состоянии. В результате математического планирования получены регрессионные уравнения в натуральных величинах для оптимизации химического состава низкоуглеродистой стали. Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для основного уровня химического состава стали. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями. Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями функции отклика не превышает 2%. Для определения химического состава обеспечивающего получение оптимальных механических свойств  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0.2}$  стали типа 10X15H15 построили трехмерные графические зависимости. На основании построенных графических зависимостей установлено, что содержание углерода и хрома в разработанной стали должно быть на верхнем пределе, а никеля – на нижнем. *Научная новизна.* Получены новые научные данные о влиянии степени легирования на механические свойства низкоуглеродистой стали. Установлены уровни содержания легирующих элементов (Cr, Ni) в опытной низкоуглеродистой стали для повышения показателей прочности. *Практическая значимость.* Рекомендуемый оптимальный химический состав стали, мас. %: углерод – 0,14 %, хром – 17,0 %, никель – 13,0 %.

**Ключевые слова:** низкоуглеродистая сталь, математическое планирование, механические свойства, легирующие элементы, оптимизация

## ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЖАРОМІЦНОЇ ОСНОВИ БІМЕТАЛІЧНОЇ ЗАГОТІВЛІ

ЗОЛОТАРЬОВ Г. А. <sup>1\*</sup>, *аспирант*  
 ШЕЙКО С. П. <sup>2</sup>, *к.т.н, докторант*  
 МІЩЕНКО В. Г. <sup>3</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1\*</sup>Кафедра обробки металів тиском, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (093) 0292223, e-mail: [zolotarev.gleb@rambler.ru](mailto:zolotarev.gleb@rambler.ru), ORCID ID: 0000-0001-9753-9974

<sup>2</sup>Кафедра обробки металів тиском, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (093) 0292223, e-mail: [shevko.s@mail.ru](mailto:shevko.s@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-5761-4263

<sup>3</sup>Кафедра прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 2891207, e-mail: [mishchen@vandex.ua](mailto:mishchen@vandex.ua), ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

**Анотація.** *Мета.* Прогресивним матеріалом для виготовлення реакторів може бути біметал, що складається з низьковуглецевої сталі у вигляді протектора з внутрішньої сторони реактора і жароміцної основи - із зовнішнього.

Необхідно встановити закономірності впливу ступеня легування на механічні властивості дослідної сталі на верхньому і нижньому межі вмісту легуючих елементів в сталі. **Методика.** Аналіз впливу вуглецю, хрому і нікелю на механічні властивості сталі вивчали з використанням статистичного методу планування активного експерименту. Як функції відгуку брали межу міцності  $\sigma_b$  і межа плинності  $\sigma_{0,2}$ . Математичну обробку експериментальних даних з метою побудови математичної моделі впливу хімічного складу на властивості сталі проводили за методиками із застосуванням регресійного аналізу. Для скорочення числа дослідів і припускаючи нелінійний характер функцій відгуку в роботі використовували симетричний композиційний план другого порядку. **Результати.** Робочі температури реакторів магнійтермічного виробництва губчастого титану становлять 850...1020 °С, і важливо визначити вплив обраного легуючого комплексу на короточасну міцність при максимальній робочій температурі за допомогою математичного планування експерименту. Інтервали варіювання факторів вибирали на підставі попередньої інформації: експериментальні та літературні дані про вплив легуючих елементів на властивості хромонікелевих сталей, механічні властивості в початковому стані. В результаті математичного планування отримані регресійні рівняння в натуральних величинах для оптимізації хімічного складу низьковуглецевої сталі. Для оцінки адекватності рівнянь було проведено розрахунок за отриманими рівняннями регресії для основного рівня хімічного складу сталі. Результати розрахунків були зіставлені з експериментальними дослідженнями. Похибка між розрахунковими і експериментальними значеннями функції відгуку не перевищує 2%. Для визначення хімічного складу забезпечує отримання оптимальних механічних властивостей  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  сталі типу 10X15H15 побудували тривимірні графічні залежності. На підставі побудованих графічних залежностей встановлено, що вміст вуглецю та хрому в розробленій сталі повинно бути на верхній межі, а нікелю - на нижньому. **Наукова новизна.** Отримані нові наукові дані про вплив ступеня легування на механічні властивості низьковуглецевої сталі. Встановлено рівні вмісту легуючих елементів (Cr, Ni) у дослідній низьковуглецевої сталі для підвищення показників міцності. **Практична значимість.** Рекомендований оптимальний хімічний склад сталі, мас. %: вуглець - 0,14%, хром - 17,0%, нікель - 13,0%.

**Ключові слова:** низьковуглецевий сталь, математичне планування, механічні властивості, легуючі елементи, оптимізація

## THE OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF HEATPROOF BASIS OF BIMETALLIC PURVEYANCE

ZOLOTAREV G. A. <sup>1</sup>, *Graduate student*  
 SHEYKO S. P. <sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), doctoral student*  
 MISHCHENKO V. G. <sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup>Department of metal forming, Zaporizhia National Technical University, st. Zhukovskoho, 64, 69063, Zaporozhe, Ukraine, tel. +38 (093) 0292223, e-mail: [zolotarev.gleb@rambler.ru](mailto:zolotarev.gleb@rambler.ru). ORCID ID: 0000-0001-9753-9974

<sup>2</sup>Department of metal forming, Zaporizhia National Technical University, st. Zhukovskoho, 64, 69063, Zaporozhe, Ukraine, tel. +38 (093) 0292223, e-mail: [shevko.s@mail.ru](mailto:shevko.s@mail.ru). ORCID ID: 0000-0001-5761-4263

<sup>3</sup>Department of applied physics, Zaporizhia National University, st. Zhukovskoho, 66, 69600, Zaporozhe, Ukraine, tel. +38 (061) 2891207, e-mail: [mishchen@vandex.ua](mailto:mishchen@vandex.ua). ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

**Abstract. Purpose.** Progressive material for the reactor can be a bimetal, consisting of a mild steel with an inner side of the tread and the reactor refractory basis - the outer. It is necessary to establish the influence of the degree of alloying patterns on the mechanical properties of experimental steel in the upper and lower limit of the content of alloying elements in the steel. **Methodology.** Analysis of the impact of carbon, chromium and nickel on mechanical properties of steel was studied using statistical method of planning of active experiment. As a response function took tensile strength  $\sigma_b$  and yield strength  $\sigma_{0,2}$ . Mathematical processing of the experimental data in order to construct a mathematical model of the influence of chemical composition on the properties of the steel was carried out by methods using regression analysis. To reduce the number of experiments and assuming the nonlinear nature of the response functions used in symmetric composite design of the second order. **Findings.** Reactor operating temperature of titanium sponge production with magnesium are 850...1020 °C, and it is important to determine the effect of selected alloying complex on short-term strength at the maximum operating temperature with the aid of mathematical planning of the experiment. Intervals varying factors selected on the basis of preliminary information: experimental and literature data on the effect of alloying elements on the properties of chromium-nickel steel, mechanical properties in the initial state. As a result of mathematical planning of regression equations were obtained in full size to optimize the chemical composition of low-carbon steel. To assess the adequacy of the equations was calculated by regression equations obtained for the ground level of the chemical composition of the steel. The calculation results were compared with experimental studies. The error between the calculated and experimental values of the response function does not exceed 2%. To determine the chemical composition ensures optimum mechanical properties  $R_m$  and  $\sigma_{0,2}$  steel type 10X15H15 built three-dimensional plots. Constructed on the basis of plots revealed that the contents of carbon and chromium in the steel to be developed at the upper limit of nickel and - at the bottom. **Originality.** New scientific evidence on the effect of doping level on the mechanical properties of low carbon steel. The levels of the content of alloying elements (Cr, Ni) in experimental mild steel to increase strength properties. **Practical value.** Recommended optimum chemical composition of the steel wt. %: carbon - 0.14%, chromium - 17.0%, nickel - 13.0%.

**Keywords:** mild steel, mathematical planning, mechanical properties, alloying elements, optimization

**Введение**

Для изготовления реакторов магнийтермического производства титана традиционно применяют хромоникелевые коррозионностойкие стали типа 05X18НЮТ, AISI 321 и AISI 304 [1-3]. Они уже давно не удовлетворяют требованиям производителей титана из-за низкого ресурса эксплуатации, а потребителям – по причине загрязнения титановой губки вредными добавками (Ni, Cr) натекающими из конструкций из этих сталей. Существует проблема повышения стойкости используемых в магнийтермическом производстве губчатого титана реакторов (реторт), средняя стойкость которых в настоящее время составляет около 30 промышленных циклов [4, 5].

Поэтому прогрессивным материалом для изготовления реакторов может быть биметалл, состоящий из низкоуглеродистой стали в виде протектора с внутренней стороны реактора и жаропрочной основы – с наружной.

Рабочие температуры реакторов магнийтермического производства губчатого титана составляют 850...1020 °С, и для начала, важно определить влияние выбранного легирующего комплекса на кратковременную прочность при максимальной рабочей температуре с помощью математического планирования эксперимента. Интервалы варьирования факторов выбирали на основании предварительной информации: экспериментальные и литературные данные о влиянии легирующих элементов на свойства хромоникелевых сталей, механические свойства в исходном состоянии.

**Цель**

Целью данной работы установление закономерностей влияния степени легирования на механические свойства опытной стали на верхнем и нижнем пределе содержания легирующих элементов в стали.

**Методика**

Анализ влияния углерода, хрома и никеля на механические свойства стали изучали с использованием статистического метода планирования активного эксперимента. В качестве функции отклика принимали предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Математическую обработку экспериментальных данных с целью построения математической модели влияния химического состава на свойства стали проводили по методикам [6, 7] с применением регрессионного анализа (табл. 1). Для сокращения числа опытов и предполагая нелинейный характер функций отклика в работе использовали симметричный композиционный план второго порядка.

**Исследуемые факторы / Investigated factors**

Характеристика	Факторы		
	C, % мас.	Cr, % мас.	Ni, % мас.
Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основной уровень	0,12	15,0	15,0
Интервал варьирования	0,02	2,0	2,0
Нижний уровень	0,10	13,0	13,0
Верхний уровень	0,14	17,0	17,0

**Результаты**

Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определяли с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проводили проверку значимости по критерию Стьюдента и оценку адекватности модели по критерию Фишера.

В результате расчетов были получены следующие уравнения:

$$\sigma_B = 235,62 - 1123,13C - 10,172Cr - 3,57Ni + 1833,33C^2 + 0,37Cr^2 + 10,94C \cdot Cr + 35,94C \cdot Ni - 0,109Cr \cdot Ni \quad (1)$$

$$\sigma_{0,2} = 48,01 - 88,75C - 0,07Cr + 1,81Ni + 833,33C^2 + 0,27Cr^2 - 17,19C \cdot Cr + 13,44C \cdot Ni - 0,334Cr \cdot Ni \quad (2)$$

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для основного уровня химического состава стали. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями. Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями функции отклика не превышает 2%.

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями. Для определения химического состава обеспечивающего получение оптимальных механических свойств  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  стали типа 10X15H15 построили трехмерные графические зависимости (рис. 1, 2) [8, 11].

Все соображения о направлении и силе влияния изученных факторов на механические свойства стали можно высказать только для выбранных в работе интервалов их изменения.

Рекомендуемый оптимальный химический состав стали, мас. %: углерод – 0,14 %, хром – 17,0 %, никель – 13,0 % [9, 10, 12, 13].

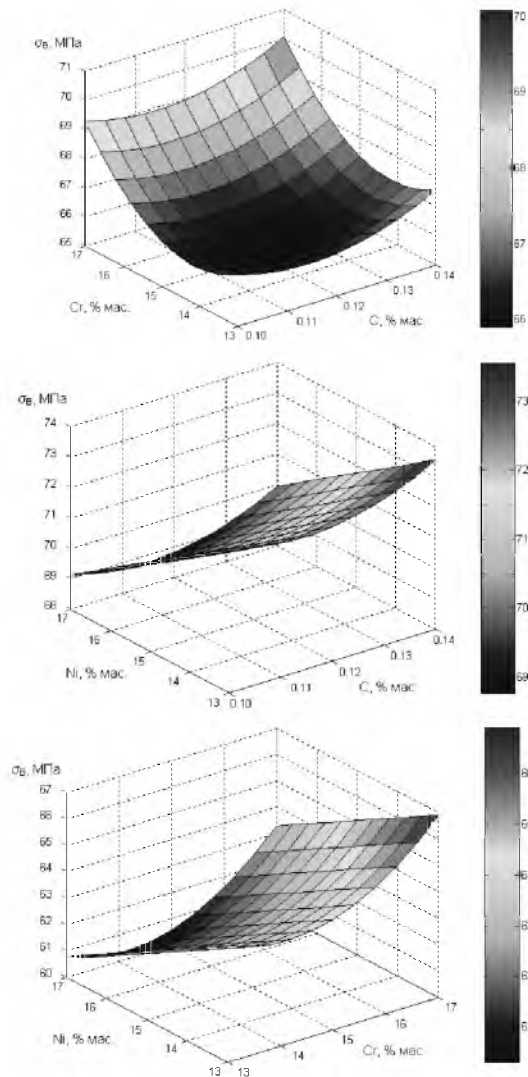


Рис. 1. Оптимизация химического состава стали 10X15H15 по пределу прочности / Optimization of the chemical composition of the steel 10X15H15 by tensile strength

#### Научная новизна и практическая значимость

Получены новые научные данные о влиянии степени легирования на механические свойства низкоуглеродистой стали.

Установлены уровни содержания легирующих элементов (Cr, Ni) в опытной низкоуглеродистой стали для повышения показателей прочности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Мищенко В. Г. Развитие разрушения аппаратов восстановления и примести в губчатом титане / В. Г. Мищенко, С. В. Твердохлеб, О. С. Омельченко // Весник двигателестроения. Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2004. – С. 135-137.

Mishchenko V. G. Razvitie razrusheniya apparatov vosstanovleniya i primesti v gubchatom titane / V. G.

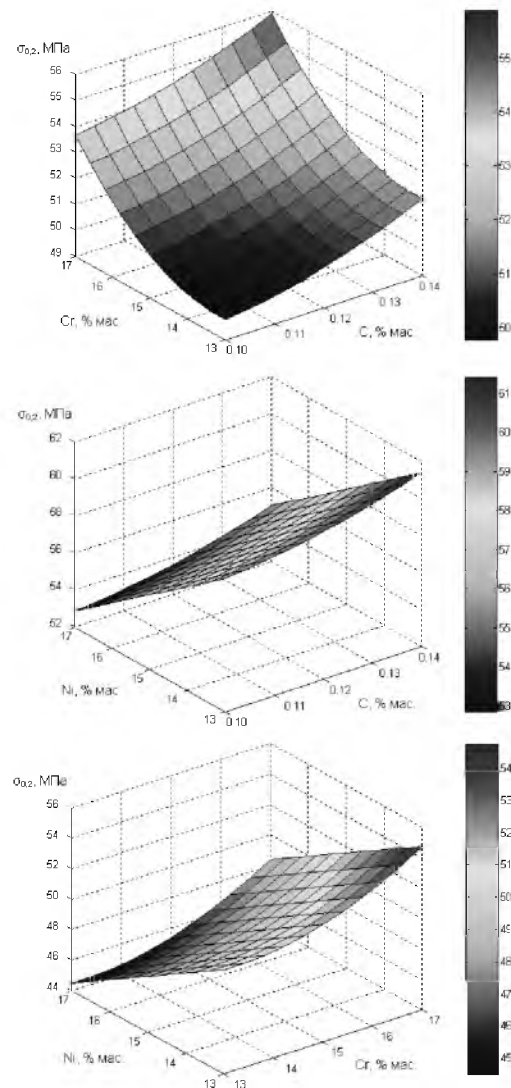


Рис. 2. Оптимизация химического состава стали 10X15H15 по пределу текучести / Optimization of the chemical composition of the steel yield strength 10X15H15

#### Вывод

На основании построенных графических зависимостей можно сделать вывод, что содержание углерода и хрома в разработанной стали должно быть на верхнем пределе – 0,14 и 17,0 % масс. соответственно, а никеля – на нижнем – 13,0 % масс.

Mishchenko, S. V. Tverdokhlebl, O. S. Omel'chenko // Vesnik dvigatelestroeniya. Zaporozh'ye: ОАО «Мотор Сич», 2004. – P. 135-137.

2. Чернышова С. П. Выбор материала для реторты аппаратов магнетермического производства титана / С. П. Чернышова, В. М. Мальшин // Цветная металлургия. – 1989. – № 7. – С. 47-49.

Chernyshova S. P. Vybora materiala dlya retorty apparatov magnetermicheskogo proizvodstva titana / S. P. Chernyshova, V. M. Mal'shin // Tsvetnaya metallurgiya. – 1989. – № 7. – P. 47-49.

3. Нечаев Н.П. К выбору материала оборудования магнетермического производства титана / Н. П. Нечаев // Цветные металлы. – 1983. – № 11. – С. 43-44.
- Nechaev N.P. K vyboru materiala oborudovaniya magnetermicheskogo proizvodstva titana / N. P. Nechaev // Tsvetnye metally. – 1983. – № 11. – P. 43-44.
4. Путина О. А. Влияние различных факторов на срок службы реторт аппаратов магнетермического производства титана / О. А. Путина, А. А. Путин, А. И. Гулякин // Цветные металлы. – 1979. – № 9. – С. 71-72
- Putina O. A. Vliyaniye razlichnykh faktorov na srok sluzhby retort apparatov magnetermicheskogo proizvodstva titana / O. A. Putina, A. A. Putin, A. I. Gulyakin // Tsvetnye metally. – 1979. – № 9. – P. 71-72
5. Путина О. А. Стойкость и защита конструкционных материалов в средах магнетермического производства губчатого титана / О. А. Путина // Защита металлов. – 1988. – Т. 24. – № 2. – С. 287-291.
- Putina O. A. Stoykost' i zashchita konstruktsionnykh materialov v sredakh magnetermicheskogo proizvodstva gubchatogo titana / O. A. Putina // Zashchita metallov. – 1988. – T. 24. – № 2. – P. 287-291.
6. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
- Novik F. S. Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov / F. S. Novik, Ya. B. Arsov. – M.: Mashinostroenie; Sofiya: Tekhnika, 1980. – 304 p.
7. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 320 с.
- Adler Yu. P. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovskiy. – M.: Nauka, 1976. – 320 p.
8. Шейко, С.П. Комплексная оптимизация химического состава низколегированной стали / С.П. Шейко // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2014. – С. 127-130.
- Sheyko, S.P. Kompleksnaya optimizatsiya khimicheskogo sostava nizkolegirovannoy stali / S.P. Sheyko // Vestnik dvigatelestroeniya. – № 1. – 2014. – P. 127-130.
- [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vidv\\_2014\\_1\\_25.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vidv_2014_1_25.pdf)
9. Гольдштейн, Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Metallurgiya, 1986. – 272 с.
- Gol'dshteyn, Ya.E. Modifitsirovaniye i mikrolegirovaniye chuguna i stali / Ya.E. Gol'dshteyn, V.G. Mizin. – M.: Metallurgiya, 1986. – 272 p.
10. Казачков, И.П. Легирование стали / И.П. Казачков. – Киев: Техника. 1982. – 120 с.
- Kazachkov, I.P. Legirovaniye stali / I.P. Kazachkov. – Kiev: Tekhnika. 1982. – 120 p.
11. Шейко, С.П. Разработка состава низколегированной стали / С.П. Шейко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 148/2014. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2014. – С. 186-188.
- Sheyko, S.P. Razrabotka sostava nizkolegirovannoy stali / S.P. Sheyko // Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Vip. 148/2014. Seriya: Mekhamka, energetika, ekologiya. – Sevastopol', 2014. – S. 186-188.
- [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&image\\_file\\_name=PDF/Vsntume\\_2014\\_148\\_35.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&image_file_name=PDF/Vsntume_2014_148_35.pdf)
12. Ващенко, И.П. Структура и свойства малоуглеродистых низколегированных сталей / И.П. Ващенко // Вестник МГТУ. – Т. 10. – №4. – 2007. – С. 558-560.
- Vashchenko, I.P. Struktura i svoystva malouglerodistykh nizkolegirovannykh staley / I.P. Vashchenko // Vestnik MGTU. – T. 10. – №4. – 2007. – P. 558-560.
- [http://vestnik.mstu.edu.ru/v10\\_4\\_n29/articles/07\\_vash.pdf](http://vestnik.mstu.edu.ru/v10_4_n29/articles/07_vash.pdf)
13. Махарова, С. Н. Влияние интенсивной пластической деформации на механизм разрушения малоуглеродистой низколегированной стали / С.Н. Махарова, М.З. Борисова // Электронный научный журнал «Исследовано в России». 2006. - С. 742.
- Makharova, S.N. Vliyaniye intensivnoy plasticheskoy deformatsii na mekhanizm razrusheniya malouglerodistoy nizkolegirovannoy stali / S.N. Makharova, M.Z. Borisova // Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Issledovano v Rossii». 2006. - S. 742.

*Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. В. А. Шаломеева (Украина); д-ром.техн.наук, проф. А. В. Овчинникова (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015