

ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ С
ОДНОВРЕМЕННЫМ НАУГЛЕРОЖИВАНИЕМ ПЛУЖНЫХ ЛЕМЕХОВ

Научная статья

Макаров А.В.^{1,*}, Колпаков А.В.², Ошурков М.В.³

¹ ORCID : 0000-0001-7284-5705;

^{1,2,3} Нижегородская Государственная Сельскохозяйственная Академия, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mechhip[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приводятся результаты планирования эксперимента по определению оптимальных значений процесса, влияющих на упрочнение и увеличение ресурса обрабатываемых деталей при помощи плана Бокса – Бенкина для трёх факторов. Уровни варьирования исследуемых факторов были выбраны на основе данных, полученных при математических расчетах протекания процесса, фактических условий режима работы экспериментальной установки. Расчёт коэффициентов уравнения регрессии математической модели эксперимента был осуществлён при помощи компьютерной среды «Statgraphics Plus for Windows» version 2.1. Используя экспериментальную математическую модель, установлен оптимальный диапазон значений показателя износа поверхности экспериментальных образцов, оцениваемый потерей толщины в миллиметрах.

Ключевые слова: основная обработка почвы, лемех плуга, износостойкость, многофакторный эксперимент.

CONDUCTING A MULTIFACTORIAL EXPERIMENT ON THE BORIDING PROCESS WITH SIMULTANEOUS
CARBONIZATION OF PLOUGHSHARES

Research article

Makarov A.V.^{1,*}, Kolpakov A.V.², Oshurkov M.V.³

¹ ORCID : 0000-0001-7284-5705;

^{1,2,3} Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (mechhip[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of experiment planning for determination of optimum process values influencing hardening and increase of service life of machined parts by means of Box – Behnken plan for three factors. Variation levels of the factors under study were selected on the basis of data obtained by mathematical calculations of the course of the process and actual operating conditions of the experimental setup. The calculation of the regression equation factors of the mathematical model of the experiment was carried out by means of the computer environment "Statgraphics Plus for Windows" version 2.1. Using the experimental mathematical model, the optimum range of values of the wear index of the surface of experimental samples, estimated by the loss of thickness in millimetres, was established.

Keywords: basic cultivation of soils, ploughshare, wear resistance, multifactorial experiment.

Введение

Актуальность темы исследований: Самой энергозатратной работой при обработке почвы является вспашка. По данным Министерства сельского хозяйства РФ общая посевная площадь на территории России увеличивается в среднем на 0,8 млн. га ежегодно на протяжении 5 лет. Ресурс современных рабочих органов почвообрабатывающих орудий в значительной степени зависит от материала заготовки и способа упрочнения. Рабочие органы подвержены, в основном, абразивному изнашиванию. Снизить интенсивность этого вида изнашивания возможно путем применения воздействий, позволяющих произвести упрочнение рабочей поверхности. В связи с этим поиск эффективных технологических процессов упрочнения является актуальной задачей, определяющей цель настоящей работы.

Цель исследований – оптимизация и определение сочетания оптимальных значений исследуемых факторов процесса бороирования с одновременным науглероживанием, обеспечивающего повышение ресурса и работоспособности рабочих поверхностей лемехов плужных корпусов.

Задача исследований – достижение таких значений исследуемых факторов процесса упрочнения образцов бороированием с одновременным науглероживанием, при которых отклик (Y) изучаемой системы достигал бы своего наименьшего значения. Таким образом, критерий оптимизации – это минимизация исследуемого процесса.

В результате изучения метода бороирования с одновременным науглероживанием были определены три наиболее значимых фактора, влияющих на упрочнение и увеличение ресурса обрабатываемых деталей: ток (x_1), количество рабочих циклов нагрузки (x_2) и толщина слоя покрытия (x_3).

Основная часть

Согласно условиям образования боридов при легировании должна соблюдаться интенсивность активирования [10]:

$$q_A^{\text{эф}} = q_{\text{сс}}$$

где $q_A^{\text{эф}}$ – энергия активирования, затраченная на обеспечение массопереноса, Дж/м²·с;

q_{cc} – энергия, необходимая для осуществления массопереноса, Дж/м²·с.

Ток необходимый для образования ванны расплава и передачи энергии для образования боридов [7]:

$$I = \frac{q_{и}}{\eta_{и} \cdot k_{пер} \cdot U}, A$$

где $q_{и}$ – необходимая энергия для протекания процесса борирования, Дж/м²·с;

$\eta_{и}$ – эффективный КПД процесса нагрева изделия электрической дугой;

$k_{пер}$ – коэффициент перевода электрохимических единиц в тепловые;

U – напряжение на электроде в процессе борирования, В.

Общая энергия, затрачиваемая на процесс борирования [2], [7], [9]:

$$q_{и} = q_{бор.} + q_{стали} + q_{A}^{\text{эф}}, \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

где $q_{бор.}$ – энергия затрачиваемая на расплавление легирующей пасты, Дж/м²·с;

$q_{стали}$ – энергия, затрачиваемая для образования сварочной ванны, Дж/м²·с;

$q_{A}^{\text{эф}}$ – энергия, затрачиваемая на образование боридов, Дж/м²·с.

Необходимое количество пасты карбида бора [6]:

$$m_{пор} = \frac{h_{обр.} \cdot \rho_{тр.пок.} \cdot x}{1000 \cdot k_{пер} \cdot 78,28}, \text{ кг}$$

где $h_{обр.}$ – глубина обработки, м;

S – площадь электрода, м²;

$\rho_{тр.пок.}$ – плотность получаемого покрытия, кг/м³;

x – требуемое содержание бора в получаемом покрытии, %;

$k_{пер}$ – коэффициент переноса состава пасты в ванну расплава [11].

Расчет энергии требуемой для расплава легирующей пасты [6]:

$$q_{бор.} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h_{пас.} \cdot T_{пас.}, \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

где λ – коэффициент теплопроводности пасты [5], Дж/м·с·К;

$h_{пас.}$ – толщина наносимой пасты, м;

$T_{пас.}$ – температура плавления пасты, К [5].

Расчет энергии, требуемой для расплава стали [6]:

$$q_{ст.} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h_{обр.} \cdot T_{ст.}, \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

где λ – коэффициент теплопроводности стали, Дж/м·с·К;

$T_{ст.}$ – температура плавления стали, К.

Расчет толщины наносимой пасты [11]:

$$h_{пас.} = V/S, \text{ м}$$

где V – объём пасты, содержащей карбид бора, требуемый для легирования, м³.

Объём пасты, содержащей карбид бора, требуемой для легирования [6]:

$$V = \rho_{пас.} / m_{пас.}, \text{ м}^3$$

где $\rho_{пас.}$ – плотность пасты, вычисленная в результате исследований, составляет 1540 кг/м³.

Путем подстановки определенных ранее величин, толщина наносимой пасты выражается в виде:

$$h_{пас.} = \frac{h_{обр.} \cdot \rho_{тр.пок.} \cdot x \cdot 5}{1000 \cdot k_{пер} \cdot 78,28 \cdot \rho}, \text{ м}$$

Расчет энергии, требуемой для образования боридов в ванне расплава [10]:

$$q_{A}^{\text{эф}} = \Delta H_{298}^0 \cdot m_{обр.}, \text{ Дж}$$

где ΔH_{298}^0 – энтальпия образования боридов в ванне расплава [10], Дж/кг;

$m_{обр.}$ – масса образовавшегося соединения, г.

Путем подстановки определенных ранее величин, зависимость тока от процентного содержания бора определяется:

$$I = \frac{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h_{\text{обр.}} \cdot \rho_{\text{тр.пок.}} \cdot x \cdot S \cdot T_{\text{пас.}}}{1000 \cdot k_{\text{пер}} \cdot 78,28 \cdot \rho_{\text{пас.}}} + 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h_{\text{обр.}} \cdot T_{\text{ст.}} + \Delta H_{298}^0 \cdot h_{\text{обр.}} \cdot S \cdot \rho_{\text{тр.пок.}} \right) \cdot S}{\eta_{\text{и}} \cdot k_{\text{пр.}} \cdot U}, \text{ A}$$

Результаты решения данного уравнения отражены графически на рисунке 1.

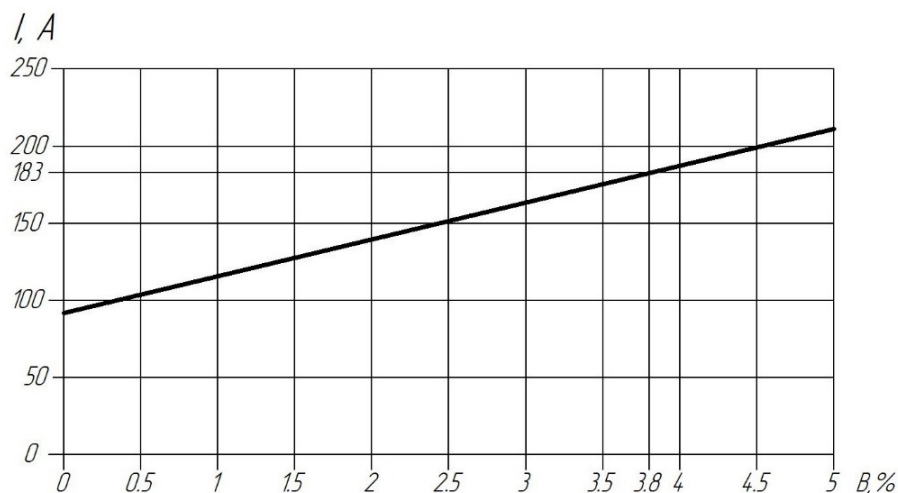


Рисунок 1 - Зависимость процентного содержания бора в обрабатываемом материале относительно тока

В качестве образцов выступали пластины, нарезанные из лемеха плуга (сталь Л53) высотой 20 мм, шириной 5 мм и толщиной 7 мм. Формирование покрытия проводилось с помощью вибродугового упрочнения. Установка включает пульт управления, вибратор с закрепленным в нем угольным электродом диаметром 10 мм, инверторный источник тока ВДУ-506.



Рисунок 2 - Общий вид установки для борирования с одновременным науглероживанием

Сравнительные испытания борированных с одновременным науглероживанием, науглероженных, наплавленных и не упрочненных образцов производились на машине трения горизонтального типа 77 – МТ1 ГОСТ 10198 – 78. Из науглероженного лемеха были вырезаны образцы сечением 5×5×20 мм. В специально изготовленной оправке образец закреплялся в неподвижном патроне машины и прижимался к бруску из белого электрокорунда 25АСМ2К20М ГОСТ 27595 – 88 зернистостью 127. Давление образца на брусок было постоянно и составляло 0,2 МПа. Через каждые 5000 циклов (двойных ходов) производился замер высоты образца микрометром МК – 25 ГОСТ 6507 – 90 с точностью 0,01 мм и производилось взвешивание на весах ВЛР – 200 ГОСТ 24104 – 80 с точностью 0,0001 г.

Уровни варьирования исследуемых факторов были выбраны на основе данных, полученных при математических расчетах протекания процесса, фактических условий режима работы экспериментальной установки и представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Ток I, А	x ₁	140	180	220	40
Количество рабочих циклов нагрузки N _ц , шт.	x ₂	5000	20000	35000	15000
Толщина слоя пасты h _п , мм	x ₃	0,1	0,2	0,3	0,1

Для реализации многофакторного эксперимента был выбран оптимальный план Бокса – Бенкина для трёх факторов [8]. Матрица эксперимента отражена таблицей 2.

Таблица 2 - Матрица оптимального плана многофакторного эксперимента

№ п/п опыта	Факторы			Параметр оптимизации
	x ₁	x ₂	x ₃	H, мм
1	1	1	0	0,79
2	-1	-1	0	0,27
3	1	-1	0	0,28
4	-1	1	0	0,74
5	1	0	1	0,60
6	-1	0	-1	0,63
7	1	0	-1	0,62
8	-1	0	1	0,61
9	0	1	1	0,78
10	0	-1	-1	0,27
11	0	1	-1	0,77
12	0	-1	1	0,26
13	0	0	0	0,56
14	0	0	0	0,58
15	0	0	0	0,57

Расчёт коэффициентов уравнения регрессии математической модели эксперимента был осуществлён при помощи компьютерной среды «Statgraphics Plus for Windows» version 2.1, в результате чего было получено уравнение регрессии экспериментальной математической модели в виде полинома первой степени:

$$Y = 0,57 + 0,005x_1 + 0,25x_2 - 0,005x_3 + 0,01x_1x_2 + 0,005x_2x_3 + \\ + 0,0225(x_1)^2 - 0,07525(x_2)^2 + 0,0225(x_3)^2$$

Для определения координат точки центра поверхности отклика, продифференцировали уравнение математической модели:

$$\begin{cases} \frac{\delta Y}{\delta x_1} = 0; 0,005 + 0,01x_2 + 0,045x_1 = 0; \\ \frac{\delta Y}{\delta x_2} = 0; 0,25 + 0,01x_1 + 0,005x_3 - 0,145x_2 = 0; \\ \frac{\delta Y}{\delta x_3} = 0; -0,005 + 0,005x_2 + 0,045x_3 = 0. \end{cases}$$

Решая систему линейных уравнений, были определены координаты оптимальной точки – центра поверхности отклика математической модели в кодированном виде:

$$\begin{aligned}x_1 &= -0,486; \\x_2 &= 1,688; \\x_3 &= -0,076.\end{aligned}$$

Проведя обратную нормализацию, были определены координаты оптимальной точки значений исследуемых факторов в натуральном виде:

$$\begin{aligned}I &= 160,56 \text{ А}; \\N_{\text{ц}} &= 45\,320 \text{ шт. циклов}; \\h_{\text{п}} &= 0,19 \text{ мм}.\end{aligned}$$

При этом значение износа поверхности экспериментальных образцов составляет

$$H = 0,987 \text{ мм}.$$

С целью графической интерпретации математической модели была построена поверхность отклика и её двухмерные сечения контурными линиями в виде изолиний равного выхода в координатах двух факторов, при назначении двух других факторов на нулевом уровне. Поверхность отклика экспериментальной математической модели представлена на рис. 2, а двухмерные сечения на рис. 3.

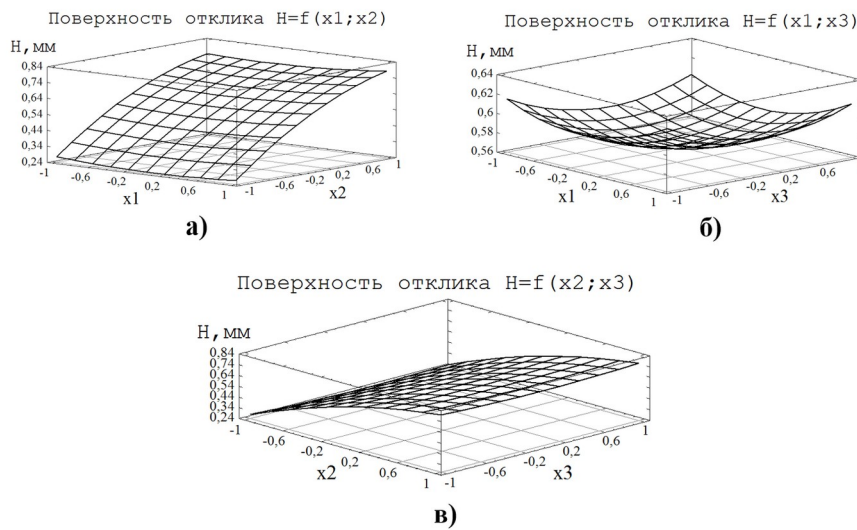


Рисунок 3 - Поверхность отклика математической модели, построенная в координатах:
 а – силы тока (x_1) и количества рабочих циклов нагрузки (x_2); б – силы тока (x_1) и толщины слоя пасты (x_3); в – количества рабочих циклов нагрузки (x_2) и толщины слоя пасты (x_3)

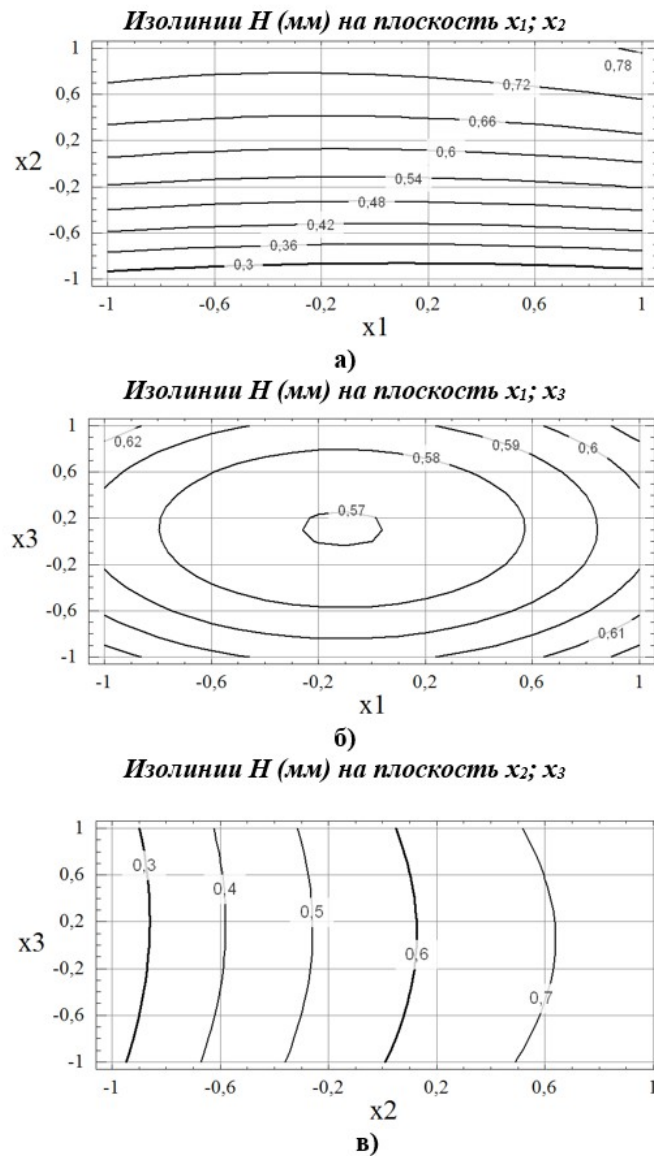


Рисунок 4 - Двухмерные сечения поверхности отклика математической модели изолиниями равного выхода, построенные в координатах:
 а – силы тока (x_1) и количества рабочих циклов нагрузки (x_2); б – силы тока (x_1) и толщины слоя покрытия (x_3); в – количества рабочих циклов нагрузки (x_2) и толщины слоя покрытия (x_3)

Поверхность отклика экспериментальной математической модели была изучена в области «условного» оптимума с использованием элементов графоаналитического метода двухмерных сечений. Оптимальные сочетания значений исследуемых факторов по изолиниям с минимальными значениями, в соответствии с рис. 2, на каждом из двухмерных сечений, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \text{- двухмерное сечение а) } \begin{cases} x_1 \in [-1; 1] \\ x_2 \in [-1; -0,86] \end{cases} ; \\
 & \text{- двухмерное сечение б) } \begin{cases} x_1 \in [-0,25; 0,025] \\ x_3 \in [-0,05; 0,25] \end{cases} ; \\
 & \text{- двухмерное сечение в) } \begin{cases} x_2 \in [-0,95; -0,825] \\ x_3 \in [-1; 1] \end{cases} .
 \end{aligned}$$

Для окончательного определения оптимального сочетания диапазонов значений исследуемых факторов, при котором отклик (Y) изучаемой системы достигал бы своего наименьшего значения, найденные значения отрезков размещались на числовых осях координат каждого из факторов.

Наложением значений полученных отрезков на четыре числовые оси исследуемых факторов, в итоге было определено оптимальное сочетание диапазонов значений исследуемых факторов в кодированном виде:

$$\begin{aligned}
 x_1 & \in [-0,25; 0,025]; \\
 x_2 & \in [-0,95; -0,86]; \\
 x_3 & \in [-0,05; 0,25].
 \end{aligned}$$

Проведя обратную нормализацию, окончательно было определено оптимальное сочетание диапазонов значений исследуемых факторов в натуральном виде:

$$\begin{aligned} I &\in [170; 181] \text{ А}; \\ N_{\text{ш}} &\in [5750; 7100] \text{ шт}; \\ h_{\text{ш}} &\in [0, 195; 0, 225] \text{ мм}. \end{aligned}$$

При этом диапазон значений износа поверхности экспериментальных образцов составляет:

$$\text{от } Y_{\text{optim}}^{\text{min}} = 0,27 \text{ мм до } Y_{\text{optim}}^{\text{min}} = 0,3 \text{ мм}.$$

Заключение

1. В результате многофакторного эксперимента, применяя математическую теорию планирования эксперимента, получена математическая модель в виде полинома второй степени, адекватно описывающая исследуемый процесс:

$$\begin{aligned} Y = & 0,57 + 0,005x_1 + 0,25x_2 - 0,005x_3 + 0,01x_1x_2 + 0,005x_2x_3 + \\ & + 0,0225(x_1)^2 - 0,07525(x_2)^2 + 0,0225(x_3)^2 \end{aligned}$$

2. Интерпретируя математическую модель, установлено влияние исследуемых факторов на параметр оптимизации.

3. Изучена поверхность отклика экспериментальной математической модели в области «условного» оптимума с использованием элементов графоаналитического метода двухмерных сечений.

4. Определено оптимальное сочетание диапазонов значений исследуемых факторов: $I \in [170; 181] \text{ А}$; $N_{\text{ш}} \in [5750; 7100] \text{ шт}$; $h_{\text{ш}} \in [0,195; 0,225] \text{ мм}$, при которых отклик изучаемой системы достигает своего наименьшего значения.

5. Используя экспериментальную математическую модель, установлен оптимальный диапазон значений показателя износа поверхности экспериментальных образцов, оцениваемый потерей толщины в миллиметрах: $H = 0,27 \dots 0,3 \text{ мм}$.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Джоу Б. Бор-углеродные покрытия: методы получения, особенности структуры и механических свойств / Б. Джоу, Д. Г. Пилипцов, С. Цзян [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. — 2019. — № 3(40). — С. 7-12.
2. Ворошин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов / Л.Г. Ворошин. — Минск: БЕЛАРУСЬ, 1981. — 205 с.
3. Гапич Д.С. Износ лемехов, изготовленных по литейной технологии / Д.С. Гапич, В.А. Моторин, Р.Н. Олейников // Известия Нижневолжского Агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2020. — № 1(61). — С. 316-326.
4. Филипов М.А. Износ и износостойкие материалы / М.А. Филипов, А.В. Макаров, А.В. Шешуков [и др.] — Екатеринбург: НТИ (филиал) УрФУ, 2019. — 372 с.
5. Карбид бора // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B1%D0%B8%D0%B4_%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0 (дата обращения: 26.02.2023).
6. Катаев Р.Ф. Теория и технология контактной сварки / Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. — Екатеринбург: Уральский университет, 2015. — 144 с.
7. Крукович М.Г. Пластичность борированных слоёв / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 384 с.
8. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алёшкин, П.М. Рощин. — Л.: Колос, 1980. — 168 с.
9. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. — Москва: Машиностроение, 1965. — 494 с.
10. Пилянкевич А.Н. Химическая энциклопедия / А.Н. Пилянкевич. — Москва: Советская энциклопедия, Большая российская энциклопедия, 1988-1998.
11. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. — Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. — 296 с.
12. Самсонов Г.В. Бориды / Г.В. Самсонов, Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов. — Москва: АТОМИЗДАТ, 1975. — 377 с.
13. Свойства бора и его соединений // ttvsif.at.ua. — URL: <https://ttvsif.at.ua/page81.html> (дата обращения: 26.02.2023).

14. Михальченко А.М. Улучшение служебных свойств лемешной стали Л53 термоупрочнением / А.М. Михальченко, С.И. Будко, А.А. Тюрева // Тракторы и сельхозмашины. — 2018. — № 3. — С. 87-91.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dzhou B. Bor-uglerodnye pokrytija: metody poluchenija, osobennosti struktury i mehanicheskikh svojstv [Boron-carbon Coatings: Preparation Methods, Structure and Mechanical Properties] / B. Dzhou, D. G. Pilipcov, S. Czjan [et al.] // Problemy fiziki, matematiki i tehniki [Problems in Physics, Mathematics and Technology]. — 2019. — № 3(40). — P. 7-12. [in Russian]
2. Voroshin L.G. Borirovanie promyshlennyh stalej i chugunov [Boriding of Industrial Steels and Cast Iron] / L.G. Voroshin. — Minsk: BELARUS, 1981. — 205 p. [in Russian]
3. Gapich D.S. Iznos lemehov, izgotovlennyh po litejnoj tehnologii [Wear and Tear on Moulded Ploughshares] / D.S. Gapich, V.A. Motorin, R.N. Olejnikov // Izvestija Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2020. — № 1(61). — P. 316-326. [in Russian]
4. Filipov M.A. Iznos i iznosostojkie materialy [Wear and Tear-resistant Materials] / M.A. Filipov, A.V. Makarov, A.V. Sheshukov [et al.] — Yekaterinburg: NTI (branch) UrFU, 2019. — 372 p. [in Russian]
5. Karbid bora [Boron Carbide] // Wikipedia. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B1%D0%B8%D0%B4_%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0 (accessed: 26.02.2023). [in Russian]
6. Kataev R.F. Teorija i tehnologija kontaktnoj svarki [Contact Welding Theory and Technology] / R.F. Kataev, V.S. Miljutin, M.G. Bliznik. — Yekaterinburg: Ural University, 2015. — 144 p. [in Russian]
7. Krukovich M.G. Plastichnost' borirovannyh slojov [Plasticity of Boron Layers] / M.G. Krukovich, B.A. Prusakov, I.G. Sizov. — Moscow: FIZMATLIT, 2010. — 384 p. [in Russian]
8. Mel'nikov S.V. Planirovanie jeksperimenta v issledovanijah sel'skohozjajstvennyh processov [Planning an Experiment in Agricultural Process Research] / S.V. Mel'nikov, V.R. Aljoshkin, P.M. Roshhin. — L.: Kolos, 1980. — 168 p. [in Russian]
9. Minkevich A.N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov [Heat Treatment of Metals and Alloys] / A.N. Minkevich. — Moscow: Mashinostroenie, 1965. — 494 p. [in Russian]
10. Piljankevich A.N. Himicheskaja jenciklopedija [Chemical Encyclopaedia] / A.N. Piljankevich. — Moscow: Sovetskaja jenciklopedija, Bol'shaja rossijskaja jenciklopedija, 1988-1998. [in Russian]
11. Rykalin N.N. Raschety teplovyh processov pri svarke [Thermal Process Calculation for Welding] / N.N. Rykalin. — Moscow: State Scientific and Technical Publishing House for Engineering Literature, 1951. — 296 p. [in Russian]
12. Samsonov G.V. Boridy [Boride] / G.V. Samsonov, T.I. Serebrjakova, V.A. Neronov. — Moscow: ATOMIZDAT, 1975. — 377 p. [in Russian]
13. Svojstva bora i ego soedinenij [Properties of Boron and its Compounds] // [tvsif.at.ua](https://tvsif.at.ua/page81.html). — URL: <https://tvsif.at.ua/page81.html> (accessed: 26.02.2023). [in Russian]
14. Mihal'chenkov A.M. Uluchshenie sluzhebnyh svojstv lemeshnoj stali L53 termouprochneniem [Improving the Performance Properties of Ploughshare Steel L53 by Thermal Hardening] / A.M. Mihal'chenkov, S.I. Budko, A.A. Tjureva // Traktory i sel'hozmashiny [Tractors and Farm Machinery]. — 2018. — № 3. — P. 87-91. [in Russian]