

# **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MAINTENANCE MEANS IN AGRICULTURE**

УДК 631.312

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710

Оригинальная статья



## **Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях**

**С. А. Сидоров, Д. А. Миронов\*, Ю. С. Ценч,  
А. В. Миронова**

*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр  
ВИМ» (г. Москва, Российская Федерация)*

*\*mironov-denis87@mail.ru*

*Введение.* Ресурс почворежущих рабочих органов зависит от характеристик материалов, из которых они изготовлены. В частности, важными параметрами, влияющими на работоспособность и долговечность деталей почвообрабатывающих орудий, являются значения и отношения коэффициентов относительной износостойкости материалов двухслойных деталей, как правило, упрочняющего наплавленного слоя и материала основы (стали). Установлено, что характеристики относительной износостойкости материалов почворежущих деталей меняются в зависимости от свойств обрабатываемой почвы. Целью исследования стало изучение влияния почвенных условий на значения коэффициентов относительной износостойкости материалов двухслойных почворежущих деталей и сравнительная оценка их ресурса и эффективности применения.

*Материалы и методы.* Приведена обобщающая зависимость пропорциональности износа значениям действующих удельных давлений. Даны характеристики изнашивающей способности почв. Научно обосновано изменение характеристик износостойкости материалов при различных значениях удельных давлений.

*Результаты исследования.* Представлены результаты эксплуатационных ресурсных испытаний и исследований двухслойных и монометаллических почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях. Определено влияние значений действующих удельных давлений на коэффициенты относительной износостойкости материалов деталей почвообрабатывающих машин.

*Обсуждение и заключение.* Выявлено, что коэффициенты относительной износостойкости материалов представляют собой не постоянную величину, а меняются в зависимости от действующих поверхностных удельных давлений. Установлена связь величин удельных давлений с параметрами почвенных состояний, в частности с твердостью почвенного пласта. При увеличении твердости обрабатываемой почвы коэффициенты относительной износостойкости различных материалов сближаются. Разница варьируется от 1,80 до 1,85 раза.

© Сидоров С. А., Миронов Д. А., Ценч Ю. С., Миронова А. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Ключевые слова:** лезвийные почворежущие рабочие органы, двухслойные почворежущие рабочие органы, почвенные условия, износостойкость, переходный коэффициент, изнашивающая способность почвы

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях / С. А. Сидоров, Д. А. Миронов, Ю. С. Ценч, А. В. Миронова. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.699-710](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.699-710) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 699–710.

## Assessment of Durability and Service Life of Two-Layer Hardened Earth Cutters in Various Soil Conditions

S. A. Sidorov, D. A. Mironov\*, Y. S. Tsench, A. V. Mironova  
*Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)*

\*[mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Introduction.** The earth cutter resource depends on the characteristics of the materials they are made from. In particular, the important parameters that directly affect the tillage tool parts efficiency and durability are the values and ratios of the coefficients of relative wear resistance of the two-layer parts materials, as a rule of the hardened deposited layer and the base material (steel). It is established that the characteristics of the relative wear resistance of the materials for earth cutter parts vary depending on the treated soil properties. The objectives of the study are to consider the influence of soil conditions on the values of the relative wear resistance coefficients of two-layer earth cutter part materials and to carry out a comparative assessment of their resource and use efficiency.

**Materials and Methods.** The authors gave a generalized dependence of the wear proportionality to the existing specific pressures values. The characteristics of soil abrasion were given. The scientific substantiation of the changes in the characteristics of the materials wear resistance at various values of specific pressures was given.

**Results.** The results of the operational resource tests and the studies of two-layer and monometallic earth cutters are presented. The influences of the values of the operating specific pressures on the coefficients of the relative wear resistance of the materials for the tillage machine parts are determined.

**Discussion and Conclusion.** The authors have found out that the coefficients of relative wear resistance of materials are not constant, but vary depending on the current surface specific pressures. The correlation of the specific pressure values with the parameters of the tillage operation, in particular with the furrow slice hardness was established. It has been found that while increasing the cultivated soil hardness, the coefficients of various materials relative wear resistance get closer to each other. The difference varies from 1.80 to 1.85 times.

**Keywords:** blade earth cutters, two-layer earth cutters, soil conditions, wear resistance, transition coefficient, soil wearing capacity

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Y.S., et al. Assessment of Durability and Service Life of Two-Layer Hardened Earth Cutters in Various Soil Conditions. *Inzhenereremye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):699-710. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.699-710>

## Введение

Лезвийные рабочие органы (лемеха, долота, лапы, ножи, диски, фрезы и др.) во многом обеспечивают эффективность почвообработывающих операций.

Известно, что создание двухслойных, как правило, упрочненных наплавочными твердосплавными покрытиями лезвийных режущих рабочих органов почвообработывающих машин является одним из наиболее эффективных способов повышения их износостойкости и общего ресурса [1–4].

Оценка эффективности использования в эксплуатационных условиях двухслойных и, в целом, упрочненных изделий является важным фактором, часто определяющим экономическую целесообразность применения тех или иных упрочняющих технологий и материалов.

Многолетние наблюдения за результатами испытаний двухслойных почворежущих рабочих органов показали, что при изменении почвенных условий относительная износостойкость (в том числе для монометаллического неупрочненного аналога) одних и тех же деталей может существенно изменяться [5–7]. Это, соответственно, влияет на характеристики эффективности использования новых упрочненных изделий.

Целью исследования является изучение влияния почвенных условий на значения коэффициентов относительной износостойкости различных материалов двухслойных лезвийных почворежущих деталей, сравнительная оценка их ресурса и эффективности применения.

## Обзор литературы

Вопросами оценки износостойкости и ресурса рабочих органов почвообработывающих машин занимался ряд отечественных ученых, таких как М. Н. Тененбаум, А. Н. Розенбаум, Д. Б. Бернштейн, В. Н. Ткачев, А. Ш. Рабинович, М. Н. Ерохин, В. Н. Виноку-

ров, В. С. Новиков и японские специалисты А. Хосуи, О. Морегаги.

В работах Д. Б. Берштейна, С. А. Сидорова, Д. А. Миронова, В. Н. Ткачева, А. Ш. Рабиновича и др. показаны преимущества использования двухслойных наплавленных почворежущих рабочих органов сельскохозяйственных машин [1; 2; 4; 6].

Труд А. Ш. Рабиновича посвящен общей теории формирования почворежущего лезвия [6].

В трудах М. М. Тененбаума, А. Н. Розенбаума, С. А. Сидорова, Я. П. Лобачевского с соавторами, Д. Б. Берштейна, японских ученых и др. отмечалось явление непостоянства относительной износостойкости материалов [8–11].

Последние исследования были уточнены и развиты авторами как с теоретической, так и с практической стороны [12–16]. Даны ссылки на практические рекомендации с учетом работ В. Н. Винокурова, связанных с анализом изнашивающей способности почв и разработок М. Н. Ерохина, В. С. Новикова [17–20].

## Материалы и методы

Известно, что величина износа определяется по следующей зависимости:

$$U = C \cdot P \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $U$  – износ в направлении действия удельного давления, мм;  $P$  – удельное давление, Мпа;  $C$  – переходной коэффициент, зависящий от характеристик используемых материалов, свойств почвы, эксплуатационных условий и др.;  $\tau$  – наработка на рабочий орган [7–10].

В приведенной зависимости удельное давление  $P$  пропорционально величине твердости почвы, скорости обработки, значениям угла резания и изменяется достаточно прогнозируемо. Величина наработки и соответствующие ей значения износов изменяются линейно.

При оценке изнашивания почворежущих рабочих органов необходимо

определить коэффициент  $C$  и, соответственно, факторы, влияющие на его изменение. Именно этот коэффициент при изменении почвенных и отчасти эксплуатационных условий подвергается наиболее значимым изменениям.

С физической точки зрения коэффициент  $C$  характеризует изнашивающую способность материалов граней (при двухслойном лезвии материалов основы и упрочняющего режущего слоя соответственно) рабочих органов почвообрабатывающих машин в определенных почвенных условиях.

Основным фактором, значительно влияющим на показатель коэффициента  $C$ , необходимо принять изнашивающую способность почвы  $\lambda$ , имеющую определение:

$\lambda$  – износ по толщине элементарной площадки, вырезанной из лезвийной части рабочего органа, изготовленного из отечественной стали 45 или ее аналога с твердостью HRC 40, эксплуатирующегося при эталонном давлении  $P_3 = 0,1$  МПа и пути трения 25 000 м (что примерно соответствует наработке в 1 га для лемеха плуга), мм/га» [9; 10].

Величина  $\lambda$  определяется по следующей эмпирической формуле [9; 10]:

$$\lambda = (X^2 + 0,08 \cdot Y + 1,5 \cdot Z) \cdot T^{1/4}, \text{ мм/га}, \quad (2)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – процентное содержание в почве (по массе) соответственно песка, глины и мелких каменистых включений (гравия, гальки и пр.) в долях от единицы, то есть  $X + Y + Z = 1$ ;  $T$  – твердость почвы на глубине обработки, МПа<sup>1</sup>.

В соответствии с классификацией почв по механическому составу Н. А. Качинского<sup>2</sup>, усредненные расчетные значения изнашивающей способности различных видов почв (глинистых, сулинистых, супесчаных, песчаных

и др.) могут колебаться в широких пределах – от 0,12 до 0,85 мм/га [9; 10].

Коэффициент  $C$ , как отмечалось выше, имеет ту же физическую природу, что и показатель «изнашивающая способность почвы», только с учетом износостойкости конкретного материала и величины реального удельного давления:

$$C = \frac{\lambda}{P_3 K_n K_\tau K_p}, \frac{\text{мм}}{\text{МПа} \cdot \text{га}}, \quad (3)$$

где  $P_3 = 0,1$  – эталонное удельное давление, Мпа;  $K_n$  – коэффициент относительной износостойкости материала при удельном давлении 0,10–0,12, МПа ( $K_n = 0,9$ –1,8 для конструкционных и высокопрочных сталей;  $K_n = 3,4$  для твердого сплава ПГ-С1 «сормайт» [2; 9];  $K_n = 3,9$  для твердого сплава ФБХ-6-2;  $K_n = 4,8$ –6,2 для твердых сплавов с добавками карбида вольфрама);  $K_\tau$  – коэффициент приведения, соответствующий наработке 1 га [10; 16; 17].

$$K_\tau = \frac{d \pm m}{0,4}, \quad (4)$$

где 0,4 – примерная ширина захвата лемешного корпуса, м;  $d$  – ширина захвата исследуемого рабочего органа, м;  $m$  – величина перекрытия (–) или расстояния (+) между рядом идущими рабочими органами, м;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий изменение коэффициента относительной износостойкости при изменении величины удельного давления [9; 10].

В данном случае именно этот коэффициент корректирует изменения приведенного выше коэффициента относительной износостойкости  $K_n$  конкретного материала в зависимости от величины удельного давления [9; 10].

Значение корректирующего коэффициента  $K_p$  отражает влияние плот-

<sup>1</sup> Сидоров С. А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 441 с.

<sup>2</sup> Качинский Н. А. Физика почв. М.: Высшая школа, 1969. 358 с.

ности (твердости) почвы и некоторых других факторов на относительную износостойкость материалов рабочих органов, воздействующих на почвенный слой.

Следует отметить, что явление коррекции параметров износостойкости материалов при изменении значений прилагаемых износных нагрузок (удельных давлений) было известно и ранее. В частности, японскими и российскими учеными было установлено, что в эксплуатационных условиях жесткого абразивного воздействия коэффициенты относительной износостойкости  $K_{и}$  различных разнородных материалов при росте удельных износоабразивных нагрузок сближаются<sup>3</sup> [2; 9; 10; 11]. Данный факт можно объяснить особенностью воздействия абразивных частиц при реализации физических процессов микрорезания и усталостного выкрашивания<sup>4</sup> [8]. При приложении больших нагрузок более износостойкий материал, в сравнении с менее износостойкими, имеет лучшие характеристики относительно аналога, но уже не столь высокие различия, как при воздействии существенно меньших нагрузок.

При увеличении прилагаемых нагрузок на идентичные абразивные частицы агрессивность воздействия (характеризующая величины износов) последних на разнородные по противоизносным свойствам материалы отличается не так сильно, как при относительно меньшем удельном нагружении.

Очевидно, что при росте действующих нагрузок величины микрообъемов, отделяемых за цикл изнашивания абразивными частицами различных материалов изделия, изменяются не прямо пропорционально абразивным свойст-

вам, характерным для них при воздействии относительно меньших нагрузок.

На данном физическом явлении – изменении уровня сопротивления абразивному изнашиванию материалов в зависимости от значений прилагаемых абразивных нагрузок – и основывается объяснение имеющихся важных различий в относительных сравнительных (именно сравниваемых между собой) показателях изменения (повышения) ресурса по износостойкости почворежущих деталей, изготовленных и упрочненных по различным вариантам, при изменении почвенных условий.

### Результаты исследования

Многолетние результаты ресурсных испытаний и исследований почворежущих рабочих органов как монометаллических (однослойных), так и биметаллических (двухслойных, наплавленных), проведенных при различных почвенных условиях на полигоне ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», подтверждают верность приведенных выше зависимостей и научных обоснований. Обобщенные данные о сравнительном ресурсе по критерию предельного износа наиболее распространенных лезвийных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях приведены в таблице.

Следует отметить, что легкие почвы (песчаные, супесчаные, легкий суглинок), как правило, имеют более высокую изнашивающую способность вследствие наличия в своем механическом составе большого количества агрессивных кварцевых частичек физического песка [12; 15]. Исключения из этой ситуации могут проявляться в условиях тяжелых сухих суглинков или черноземов.

<sup>3</sup> Хасун А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с японского В. Н. Попова. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.; Тененбаум М. Н. О непостоянстве относительной износостойкости // Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин. М.: ВИСХОМ, 1971. С. 57–63.

<sup>4</sup> Рабинович И. П., Тененбаум М. М., Торнер Р. В. Исследование материалов деталей сельхозмашин. М.: ВИСХОМ, 1969. 205 с.

**Результаты сравнительных ресурсных износных испытаний рабочих органов  
почвообрабатывающих машин, изготовленных с использованием различных материалов  
и упрочняющих технологий**

**The results of comparative resource wear tests of the working bodies of tillage machines, made  
using various materials and hardening technologies**

№	Вид рабочего органа, материал, упрочняющая технология / Type of working body, material, hardening technology	Ресурс по износостойкости, га / Wear resistance resource, ha		Усредненный коэффициент повышения ресурса относительно базового (серийного) варианта / Average coefficient of resource increase relative to the basic (serial) version		Усредненное значение приведенного коэффициента относительной износостойкости ( $K_n \cdot K_p$ ) покрытия / Average value of the relative wear resistance reduced coefficient ( $K_n \cdot K_p$ ) of the coating	
		На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha	На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha	На легких (0,7–2,0 МПа) почвах, га / On light (0.7–2.0 MPa) soils, ha	На тяжелых (2,3–4,5 МПа) почвах, га / On heavy (2.3–4.5 MPa) soils, ha
1	Лемех плуга долотообразный, серийный, несплавленный, из сталей Л53, 65Г / The chisel-shaped serial not welded, plow share from L53, 65G steels	4,00–10,50	17,00–21,00	1,00	1,00	–	–
2	Лемех плуга долотообразный, серийный, наплавленный сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из сталей Л53, 65Г / The chisel-shaped, serial welded alloy PG-FBH-6-2, plow share from L53, 65G steel	11,00–27,00	32,00–40,00	2,60–2,80	1,70–1,90	3,70–4,00	2,20–2,40
3	Накладное долото трапециевидного лемеха плуга монометаллическое, из сталей 65Г, 30ХГСА / Mono-metal overhead chisel of trapezoidal plow share from 65G, 30HGSA steel	3,00–6,00	9,50–13,50	1,00	1,00	–	–

4	Накладное долото трапецевидного лемеха плуга, наплавленное сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из стали 30ХГСА / Overhead chisel of a trapezoidal plow share fused with PG-FBH-6-2 alloy, made of 30HGSA steel	7,50–14,00	15,00–22,50	2,30–2,50	1,50–1,65	3,50–3,80	2,00–2,20
5	Лапа культиватора КПС-4 шириной 330 мм монометаллическая, серийная, из стали 65Г / KPS-4 cultivator paw 330 mm wide monometallic serial made of 65G steel	11,50–15,00	24,00–26,00	1,00	1,00	–	–
6	Лапа культиватора КПС-4 шириной 330 мм, наплавленная сплавом ПГ-ФБХ-6-2, из стали 65Г / KPS-4 cultivator paw 330 mm wide surfaced with PG-FBH-6-2 alloy made of 65G steel	33,00–39,50	41,00–49,00	2,70–2,90	1,70–2,00	3,80–4,00	2,30–2,60

На рисунке приведен вид наложенных друг на друга изношенных монометаллических и двухслойных наплавленных накладных долот лемехов плугов, эксплуатирующихся в различных почвенных условиях.

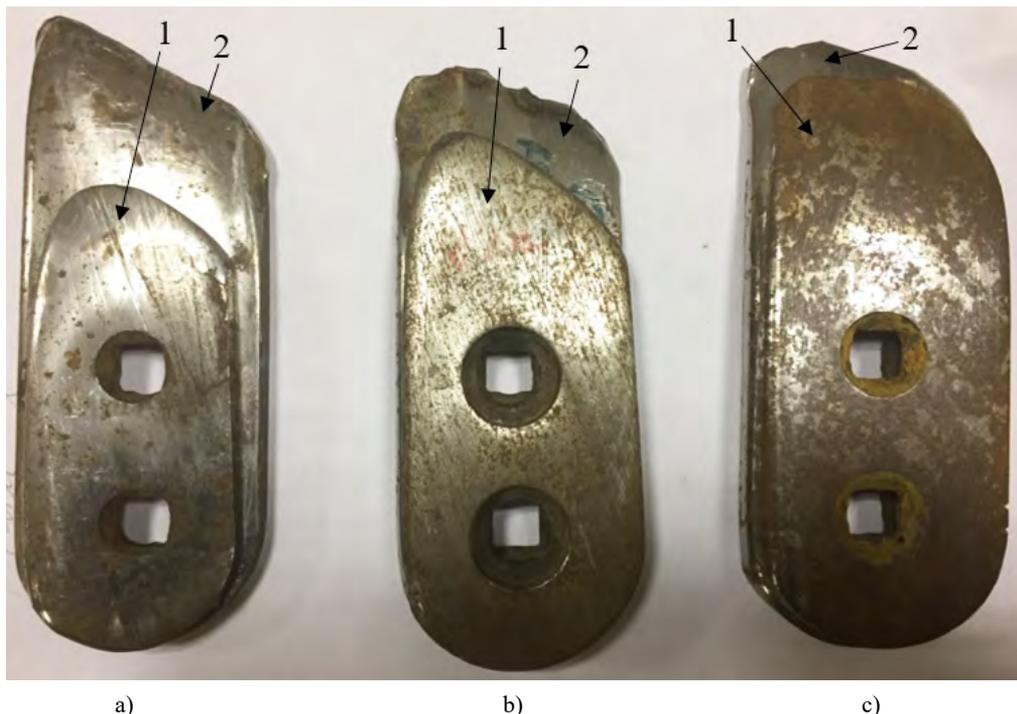
Как видно из рисунка и анализа таблицы, при росте действующих удельных нагрузок, пропорциональных твердости почвы, коэффициенты относительной износостойкости материалов основы и упрочняющего слоя рабочих органов существенно изменяются в сторону сближения. При этом очевидно, что максимальное повышение ресурса наплавленных упрочненных изделий имеет место в условиях эксплуатации на легких песчаных, су-

песчаных, легкосуглинистых почвах. Экспериментально установлено, что отличие коэффициентов относительной износостойкости сравниваемых материалов в различных почвенных условиях в пределе может достигать величины 1,80–1,85.

Исходя из результатов экспериментальных данных для коэффициента  $K_p$  в выражении (3), можно предположить следующую эмпирическую зависимость:

$$K_p = 1,15 - 1,3P + 0,7P^2. \quad (5)$$

Соответственно, максимальные величины удельных давлений  $P$ , действующие на верхнюю и нижнюю ( $P_1$  и  $P_2$ )



Р и с. Изношенные монометаллические (1) и наплавленные двухслойные (2) идентичные накладные долота плугов после наработки 5–6 га в условиях эксплуатации на следующих типах почв: а) на легких песчаных,  $T = 0,8–1,8$  МПа; б) на среднесуглинистых,  $T = 2,1–2,9$  МПа; с) на тяжелых суглинистых,  $T = 3,3–4,8$  МПа

Fig. Comparative types of worn-out monometallic (1) and deposited two-layer (2) identical overhead plows' bits after processing 5–6 ha in operating conditions on the following soil types: а) on light sand,  $T = 0.8–1.8$  MPa; б) on medium loamy soil,  $T = 2.1–2.9$  MPa; с) on heavy loamy soil, heavy clay soil,  $T = 3.3–4.8$  MPa

границы почворезающего лезвия, определяются по зависимостям [4]:

$$P_1 = (0,025 - 0,045) \cdot (1 + 0,01\varepsilon_0) \times (1 + 0,1v) \cdot (0,8 + T), \text{ МПа}, \quad (6)$$

$$P_2 = (0,05 - 0,07) \cdot (1 + 0,01\varepsilon_0) \times (1 + 0,1v) \cdot (1,3 + T^{1,5}), \text{ МПа}, \quad (7)$$

где  $T$  – твердость почвы, МПа;  $\varepsilon_0$  – угол установки рабочего органа, град;  $v$  – скорость обработки почвы, м/с; значения  $P$  могут находиться в пределах  $P \in [0,07–0,95]$ , МПа.

Представленные объективные закономерности следует учитывать при

расчете экономической эффективности использования и целесообразности применения новых разрабатываемых почворезающих рабочих органов. Как известно, экономическая эффективность использования новых изделий пропорциональна соотношению цена/ресурс [14; 15]. В частности, в отдельных случаях желательно для разработки и изготовления новых упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин, особенно эксплуатирующихся на тяжелых почвах, использовать более износостойкие высокопрочные стали [18–20], а в железоуглеродистые наплавленные сплавы добавлять литой карбид вольфрама [17–20].

### Обсуждение и заключение

Коэффициенты относительной износостойкости материалов (сталей, упрочняющих твердых сплавов) почво-режущих рабочих органов не являются постоянными величинами, а меняются при вариации действующих поверхностных удельных давлений, пропорциональных и зависящих в основном от твердости обрабатываемой почвы.

Установлено, что в реальных почвенных условиях коэффициенты относительной износостойкости упрочняющих твердосплавных материалов и материалов основы (стали) при повышении твердости обрабатываемой

почвы и соответствующих удельных давлений сближаются. Различие в коэффициентах относительной износостойкости сравниваемых материалов почвообрабатывающих рабочих органов может доходить до 1,80–1,85 раза.

Соответственно, при эксплуатации в тяжелых почвенных условиях ( $T > 2,5\text{--}3,0$  МПа) эффективность применения упрочняющих технологий, в частности наплавочных, несколько снижается. Этот факт должен учитываться при подборе материалов основы и упрочняющего «режущего» слоя двухслойных биметаллических почворежущих деталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бернштейн, Д. Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга / Д. Б. Бернштейн // Тракторы и сельхозмашины. – 2002. – № 6. – С. 39–42. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (дата обращения: 06.11.2020).
2. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines / S. A. Sidorov, D. A. Mironov, V. K. Khoroshenkov, E. I. Khlusova. – DOI 10.1080/09507116.2016.1148408 // Welding International. – 2016. – Vol. 30, Issue 10. – Pp. 808–812. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09507116.2016.1148408> (дата обращения: 06.11.2020).
3. Сурилов, В. С. Исследование износостойкости двухслойных и однородных дисков лушителей / В. С. Сурилов, В. А. Овчинников // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 8. – С. 28–29.
4. Ткачев, В. Н. Повышение долговечности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Н. Ткачев, И. Л. Коган // Тракторы и сельхозмашины. – 1969. – № 8. – С. 32–33.
5. Колесов, В. Г. О повышении долговечности деталей, изнашивающихся при трении о грунт, и рациональном выборе сплавов для их наплавки / В. Г. Колесов // Вестник машиностроения. – 1961. – № 9. – С. 22–26.
6. Рабинович, А. Ш. Элементарная теория лезвия и методы проектирования самозатачивающихся почворежущих лезвий / А. Ш. Рабинович // Тракторы и сельхозмашины. – 1961. – № 10. – С. 33–36.
7. Розенбаум, А. Н. Применение двухслойного проката для самозатачивающихся почворежущих деталей / А. Н. Розенбаум // Тракторы и сельхозмашины. – 1966. – № 10. – С. 27–29.
8. Тененбаум, М. М. О методике расчета долговечности изнашивающихся деталей с.х. машин с учетом нелинейности динамики изнашивания / М. М. Тененбаум // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 9. – С. 29–31.
9. Сидоров, С. А. Методика расчета на износостойкость моно- и биметаллических почворежущих рабочих органов / С. А. Сидоров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 12. – С. 35–39. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2003/200312.htm> (дата обращения: 06.11.2020).
10. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники / А. Ю. Измайлов, С. А. Сидоров, Я. П. Лобачевский [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2012. – № 3. – С. 5–7. – Рез. англ.
11. Бернштейн, Д. Б. Оценка возможности самозатачивания двухслойных почворежущих элементов при абразивном изнашивании / Д. Б. Бернштейн // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 6. – С. 31–33.

12. **Винокуров, В. Н.** Исследование изнашивающей способности почв лесной зоны / В. Н. Винокуров // Тракторы и сельхозмашины. – 1977. – № 8. – С. 20–22.
13. Modeling the Technological Process of Tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004 // Soil & Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – Pp. 70–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718311760?via%3Dihub> (дата обращения: 06.11.2020).
14. **Ерохин, М. Н.** Прогнозирование ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Сельский механизатор. – 2015. – № 11. – С. 6–9. – URL: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (дата обращения: 06.11.2020). – Рез. англ.
15. **Ерохин, М. Н.** К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 206–212. – Рез. англ.
16. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing / S. A. Sidorov, V. K. Khoroshenkov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-017-0443-7 // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60. – Pp. 1290–1294. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-017-0443-7#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
17. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide / S. A. Sidorov, Ya. P. Lobachevskii, V. K. Khoroshenkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-018-0602-5 // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61. – Pp. 1023–1028. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-018-0602-5#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
18. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines / A. Yu. Izmaylov, S. A. Sidorov, V. K. Khoroshenkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11041-017-0130-0 // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – Vol. 59. – Pp. 208–210. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11041-017-0130-0#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
19. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests / V. V. Ryabov, G. D. Motovilina, E. I. Khlusova [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-016-0374-8 // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – Pp. 839–844. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-016-0374-8#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).
20. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding / Y. P. Lobachevskii, V. F. Aulov, A. V. Ishkov [et al.]. – DOI 10.1007/s11015-019-00731-z // Metallurgist. – 2019. – Vol. 62. – Pp. 986–993. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11015-019-00731-z#citeas> (дата обращения: 06.11.2020).

*Поступила 02.06.2020; принята к публикации 10.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Сидоров Сергей Алексеевич**, заведующий лабораторией элементной базы машин для обработки почвы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, Researcher ID: AAN-6236-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7638-2020>

**Миронов Денис Александрович**, старший научный сотрудник лаборатории элементной базы машин для обработки почвы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-2026>, [mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Ценч Юлия Сергеевна**, заместитель директора по образованию и редакционно-издательской деятельности ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат педагогических наук, Researcher ID: H-5855-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimasp@mail.ru](mailto:vimasp@mail.ru)

**Миронова Анастасия Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1390-1812>, [timchenko-anastasia93@mail.ru](mailto:timchenko-anastasia93@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. А. Сидоров – формирование основной концепции, разработка расчетных формул, описание основных результатов исследования, участие в формировании выводов; Д. А. Миронов – изготовление и упрочнение опытных партий образцов рабочих органов, организация и проведение полевых сравнительных эксплуатационных испытаний, оценка и анализ результатов эксплуатационных испытаний; Ю. С. Ценч – участие в формировании целей исследования, участие в экспериментальных исследованиях, обсуждение результатов исследований, участие в написании текста; А. В. Миронова – участие в экспериментальных исследованиях, участие в подготовке и оформлении текста, участие в анализе результатов исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bernshteyn D.B. [Abrasive Blade Wear and Tear and Plough Performance]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2002; (6):39-42. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
2. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., et al. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines. *Welding International*. 2016; 30(10):808-812. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148408>
3. Surilov V.S., Ovchinnikov V.A. [Study of Wear Resistance of the Two-Layer and Homogeneous Disks of Shakers]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1970; (8):28-29. (In Russ.)
4. Tkachev V.N., Kogan I.L. [Increasing the Durability of Soil Tillage Machine Disc Working Elements]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1969; (8):32-33. (In Russ.)
5. Kolesov V.G. [On Increasing the Durability of Parts That Wear Out with Friction against the Ground, and a Rational Choice of Alloys for Their Surfacing]. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Federation Engineering Research. 1961; (9):22-26. (In Russ.)
6. Rabinovich A.Sh. [Elementary Blade Theory and Design Methods for Self-Sharpening Soil-Cutting Blades]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1961; (10):33-36. (In Russ.)
7. Rozenbaum A.N. [Application of Two-Layer Rolled Products for Self-Sharpening Soil-Cutting Parts]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1966; (10):27-29. (In Russ.)
8. Tenenbaum M.M. [About the Method of Calculating the Durability of Wearing Parts of Agricultural Machinery, Taking Into Account the Nonlinearity of Wear Dynamics]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1970; (9):29-31. (In Russ.)
9. Sidorov S.A. [Methods of Calculation for Wear Resistance of Mono and Bimetallic Soil-Cutting Working Bodies]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2003; (12):35-39. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2003/200312.htm> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
10. Izmailov A. Yu., Sidorov S.A., Lobachevsky Ya.P., et al. Scientific Principles of Raising Wear Resistance in Working Organs of Soil Tillage Machinery. *Vestnik Rossiyskoy akademii selkhoz mashinostroyeniya nauk* = Bulletin of Russian Academy of Agricultural Sciences. 2012; (3):5-7. (In Russ.)
11. Bernshteyn D.B. [Evaluation of the Possibility of Self-Sharpening of Two-Layer Soil-Cutting Elements at Abrasive Wear]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1985; (6):31-33. (In Russ.)
12. Vinokurov V.N. [Study of the Wearing Capacity of the Forest Area Soils]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1977; (8):20-22. (In Russ.)
13. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the Technological Process of Tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019; 190:70-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
14. Erokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. Predicting Resource of Tillers Working Organs. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2015; (11):6-9. Available at: <http://selmech.msk.ru/1115.html> (accessed 06.11.2020). (In Russ.)
15. Yerokhin M.N., Novikov V.S., Petrovskiy D.I. [On the Issue of Import Substitution of Working Bodies of Foreign Tillage Machines]. *Trudy GOSNITI* = Works of GOSNITI. 2015; 121:206-212. (In Russ.)

16. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevsky Y.P., et al. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing. *Metallurgist*. 2017; 60:1290-1294. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0443-7>
17. Sidorov S.A., Lobachevskii Ya.P., Khoroshenkov V.K., et al. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide. *Metallurgist*. 2018; 61:1023-1028. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0602-5>
18. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., et al. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017; 59:208-210. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0130-0>
19. Ryabov V.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., et al. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests. *Metallurgist*. 2016; 60:839-844. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0374-8>
20. Lobachevsky Y.P., Aulov V.F., Ishkov A.V., et al. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Boriding. *Metallurgist*. 2019; 62:986-993. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00731-z>

*Received 02.06.2020; revised 10.09.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Sergey A. Sidorov**, Head of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [AAN-6236-2020](https://orcid.org/0000-0002-7638-2020), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7638-2020>

**Denis A. Mironov**, Senior Researcher of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-2026>, [mironov-denis87@mail.ru](mailto:mironov-denis87@mail.ru)

**Yuliya S. Tsench**, Deputy Director for Education and Editorial and Publishing Activities, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Pedagogy), Researcher ID: [H-5855-2018](https://orcid.org/0000-0002-3214-4725), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, [vimasp@mail.ru](mailto:vimasp@mail.ru)

**Anastasiya V. Mironova**, Researcher of the Laboratory of the Elementary Base of Tillage Machines, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1390-1812>, [timchenko-anastasia93@mail.ru](mailto:timchenko-anastasia93@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

S. A. Sidorov – formation of the basic concept, development of calculation formulas, description of the basic research results, participation in the formation of conclusions; D. A. Mironov – fabrication and strengthening of pilot batches of working body samples, organization and conduct of field comparative operational tests, evaluation and analysis of operational test results; Y. S. Tsench – participation in the formation of research objectives, participation in experimental research, discussion of research results, participation in text writing; A. V. Mironova – participation in experimental research, participation in preparation and design of the text, participation in the analysis of research results.

*All authors have read and approved the final manuscript.*