

Исследование процесса изнашивания упрочненных почворезущих элементов лесохозяйственных машин

В.И. Кретинин^a, В.А. Соколова^b, В.А. Марков^c, А.В. Теппов^d

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^a KVI_1960@mail.ru, ^b sokolova_vika@inbox.ru, ^c mactor85@mail.ru, ^d avt01@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>; ^b <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>; ^d <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>

Статья поступила 12.01.2020, принята 13.02.2020

Авторы статьи фокусируют внимание на вопросе повышения долговечности почвообрабатывающих рабочих органов. Важнейшими технологическими операциями в деле воспроизводства лесных ресурсов являются подготовка почвы и посадка лесных культур. Применяемые для этих целей почвообрабатывающие машины и орудия в ряде случаев не обеспечивают надлежащего качества выполняемых работ из-за быстрого затупления режущих элементов (лемехов, лап, дисков, ножей и др.). Работоспособность почвообрабатывающих машин определяется доремонтным ресурсом их рабочих органов. Изменение формы рабочих органов лесохозяйственных машин в результате изнашивания является одной из основных причин нарушения агротехнических требований и общего ухудшения показателей их работы. Наиболее важной и трудноразрешимой является задача сохранения остроты режущих деталей. Остроту лезвия в общем виде можно определить как способность концентрировать контактные напряжения в разрушаемом материале — порубочных остатках, корневой системе и др. При использовании биметаллических лезвий их остроту связывают с толщиной «режущего» слоя. В ходе исследования обосновывается тезис о том, что закономерность и величина износа биметаллических почворезущих элементов зависит от соотношения толщины армирующего (упрочняющего) h_a и несущего h_n слоев, а также от их износостойкости. Раскрыта методика оценки динамики изнашивания биметаллических лезвий. Выявлена закономерность изнашивания биметаллических упрочненных почворезущих элементов лесохозяйственных машин и формоизменение самозатачивающегося лезвия с целью определения рациональной толщины износостойкого покрытия. Получены зависимости интенсивности изнашивания лезвия I от толщины износостойкого слоя. Особое внимание уделяется износостойкости и формоизменению самозатачивающегося лезвия. Обосновывается также предположение о том, что стойкость биметаллического лезвия в отношении абразивного изнашивания определяется свойствами основного и упрочненного слоя. На основе проведенных исследований получена математическая модель таких механических свойств, как износостойкость упрочненных почворезущих деталей рабочих органов лесохозяйственных машин.

Ключевые слова: почворезущий элемент; износостойкость; биметаллическое лезвие; упрочняющее покрытие; самозатачивание.

Study of wear process of reinforced soil cutting elements of forestry machines

V.I. Kretinin^a, V.A. Sokolova^b, V.A. Markov^c, A.V. Tepпов^d

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

^a KVI_1960@mail.ru, ^b sokolova_vika@inbox.ru, ^c mactor85@mail.ru, ^d avt01@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>; ^b <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>; ^d <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>

Received 12.01.2020, accepted 13.02.2020

The article focuses on the issue of increasing the durability of soil-working bodies. The most important technological operations in the reproduction of forest resources are soil preparation and planting of forest crops. Soil-processing machines and implements used for these purposes in some cases do not provide the proper quality of work due to the rapid blunting of cutting elements (plowshares, paws, disks, knives, etc.). The efficiency of soil-processing machines is determined by the pre-repair resource of their working bodies. Changing the shape of the working bodies of forestry machines as a result of wear is one of the main causes of violation of agrotechnical requirements and a general deterioration in their performance. The most important and intractable task is to preserve the sharpness of the cutting parts. The sharpness of the blade in general can be defined as the ability to concentrate contact stresses in the material being destroyed - chopping residues, root system, etc. When using bimetallic blades, their sharpness is associated with the thickness of the "cutting" layer. The study substantiates the assertion that the regularity and amount of wear of bimetallic soil-cutting elements depends on the ratio of the thickness of the reinforcing and bearing layers, as well as on their wear resistance. A technique for assessing the dynamics of wear of bimetallic blades is disclosed. The pattern of wear of bimetallic hardened soil-cutting elements of forestry machines and the shape change of a self-sharpening blade to determine the rational thickness of a wear-resistant coating are revealed. The dependences of the wear rate of the blade on the thickness of the wear-resistant layer

are obtained. Particular attention is paid to the wear resistance and shaping of the self-sharpening blade. It also substantiates the assumption that the resistance of a bimetallic blade to abrasive wear is determined by the properties of the base and hardened layers. On the basis of the conducted research, a mathematical model of such mechanical properties as wear resistance of hardened soil-cutting parts of working bodies of forestry machines is obtained.

Keywords: earth cutter; wear resistance; bimetallic blade; hardening coating; self-sharpening.

Введение. Изменение формы рабочих органов лесохозяйственных машин в результате изнашивания является одной из основных причин нарушения агротехнических требований и общего ухудшения показателей их работы. Наиболее важной и трудноразрешимой является задача сохранения остроты режущих деталей. Остроту лезвия в общем виде можно определить как способность концентрировать контактные напряжения в разрушаемом материале — порубочных остатках, корневой системе и др.

При использовании биметаллических лезвий В.Н. Ткачев и А.Ш. Рабинович [1–3] связывают остроту лезвия с толщиной «режущего» слоя, которая должна быть сообразована с требуемой остротой лезвия. Для почворежущих деталей лесопосадочных машин предельная толщина лезвия составляет 1,5 мм [4; 5]. По достижении этой величины необходима его перезаточка до толщины 0,5 мм. Для одностороннего лезвия величина износа по ширине определяется:

$$U_{л} = \frac{d_k g}{h_{л}} * L, \quad (1)$$

где $U_{л}$ — износ лезвия по ширине; L — путь трения; g — среднее удельное давление почвы; $h_{л}$ — толщина лезвия; d_k — коэффициент, зависящий от механического и минералогического состава почвы и износостойкости материала.

Как видно из выражения (1), величина износа зависит от толщины лезвия.

У биметаллических почворежущих деталей величина износа зависит, при одинаковых условиях эксплуатации, от соотношения толщины армирующего (упрочняющего) h_a и несущего h_n слоев, а также от их износостойкости.

Цель исследования. Выявить закономерность изнашивания биметаллических упрочненных почворежущих элементов лесохозяйственных машин и формоизменение самозатачивающегося лезвия с целью определения рациональной толщины износостойкого покрытия.

Методика исследования. С целью выявления динамики изнашивания почворежущих элементов были проведены исследования на лабораторной установке «вращающаяся чаша» (ВЧ) по схеме, представленной на рис. 1. Проводимые испытания позволяют определить влияние свойств и параметров упрочняющего покрытия на износостойкость деталей при обеспечении одинаковых внешних условий.

Лабораторный стенд представляет собой рамную конструкцию, на которой литая чаша, опираясь на радиально-упорный подшипник, вращается со скоростью, отвечающей скорости резания — 1,1 м/с. Испытуемый образец закрепляется на специальной стойке и разрезает укатанный в три стадии катками пласт почвенной массы. При проведении исследований механический состав почвы соответствовал среднему су-

глинку, что характерно для почв северо-западного региона. Данные почвы обладают одной из наибольших изнашивающих способностей.

Для оценки износостойкости и самозатачивания лезвий из различных материалов изготавливались образцы из стали Ст.3 твердостью по Бринелю 1 187 МПа и стали 65Г твердостью 2 742 МПа, моделирующие форму лезвия сошника лесопосадочной машины. Режущий (армирующий) слой получали путем газопламенного напыления сплава ПР-Н70Х17С4Р4 с последующим его оплавлением. Покрытие наносилось на технологических режимах, обеспечивающих равномерность толщины покрытия и наибольшую прочность сцепления. Толщина армирующего слоя изменялась от 0,5 до 2 мм.

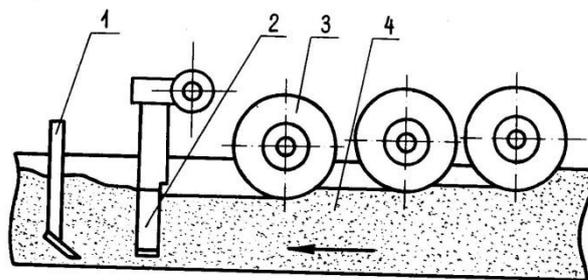


Рис. 1. Схема испытаний на установке ВЧ: 1 — подрезающий нож; 2 — испытуемый образец; 3 — каток; 4 — почвенная масса

Результаты исследования. На первом этапе исследований выявлялась динамика изнашивания лезвия в зависимости от наработки (пути трения) по изменению его линейного размера. На уровне отмеченного сечения определялась ширина лезвия как среднее из трех измерений, а профиль копировался оттиском свинцовой пластины. Для каждого материала основы было подготовлено пять вариантов образцов с трехкратной повторностью. Результаты изнашивания эталонных и упрочненных лезвий представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Как видно из приведенных графиков (см. рис. 2), зависимость износа самозатачивающегося лезвия по геометрическим размерам от пути трения аппроксимируется линейной зависимостью вида:

$$U = d_k * L, \quad (2)$$

где U — величина износа лезвия по ширине, мм; L — путь трения, км; d_k — эмпирический коэффициент, характеризующий износ лезвия, мм/км.

При постоянной изнашивающей способности почвы коэффициент d_k характеризует способность лезвия сопротивляться абразивному изнашиванию и определяет в данном случае искомую характеристику — интенсивность изнашивания.

Согласно диаграмме (рис. 2), интенсивность изнашивания в любой момент времени может быть определена как тангенс угла наклона касательной к линии износа:

$$I = tg\alpha = \frac{du}{dt}, \quad (3)$$

где I – интенсивность изнашивания, мм/км.

Таблица 1. Динамика изнашивания лезвий, армированных сплавом ПР-Н70Х17С4Р4 на различную толщину

Материал основы	Толщина покрытия, мм	Износ (мм) на пути трения протяженностью, км						Математическое ожидание интенсивности изнашивания, мм/км
		1,98	3,96	5,94	7,92	9,9	11,88	
Сталь Ст.3	0	0,95	1,85	2,9	3,90	4,90	5,85	0,488
	0,8	0,43	0,88	1,28	1,68	2,13	2,58	0,205
	1,0	0,3	0,65	0,95	1,30	1,60	1,91	0,159
	1,2	0,24	0,49	0,76	1,01	1,24	1,51	0,125
	1,4	0,21	0,43	0,64	0,83	1,03	1,26	0,105
Сталь 65Г	0	0,49	1,0	1,5	1,98	2,45	2,95	0,249
	0,5	0,35	0,69	1,05	1,39	1,76	2,1	0,175
	1,0	0,24	0,50	0,75	1,00	1,25	1,51	0,120
	1,4	0,16	0,33	0,50	0,65	0,81	0,96	0,085
	1,8	0,14	0,29	0,43	0,58	0,72	0,85	0,07

В общем случае изнашивание является случайным процессом, следовательно и интенсивность изнашивания — величина случайная. Поэтому в табл. 1 приведено значение математического ожидания интенсивности изнашивания.

Проведенный регрессионный анализ результатов экспериментов позволил получить корреляционную зависимость интенсивности изнашивания лезвия I от толщины износостойкого слоя.

Наилучшее совпадение результатов экспериментов с результатами расчета показала зависимость вида:

$$y = a * b^x. \quad (4)$$

После расчета коэффициентов методом наименьших квадратов и проверки на адекватность расчетных значений результатами эксперимента по F-критерию Фишера получены следующие выражения:

– для материала основы сталь Ст.3:

$$I = 0,485 * 0,333^{h_a}; \quad (5)$$

– для материала основы сталь 65Г:

$$I = 0,248 * 0,494^{h_a}. \quad (6)$$

Таким образом, можно отметить, что с увеличением толщины покрытия износостойкость лезвия возрастает.

Коэффициент износостойкости исследуемых биметаллических лезвий определяли как:

$$K_u = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{упр}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{э}}$ и $I_{\text{упр}}$ – среднее арифметическое значение интенсивности изнашивания эталонного и упрочненного образцов. При толщине покрытия $h_a = 1,4$ мм для стали 65Г: $K_u = 2,8..3$, а для материала Ст.3 $K_u = 4,3..4,6$. Стойкость биметаллического лезвия в отношении абразивного изнашивания определяется свойствами основного и упрочненного слоя [6; 7]. В связи с этим рассмотрим влияние износостойкости и соотношение толщин соответствующих слоев на износостойкость самозатачивающегося лезвия.

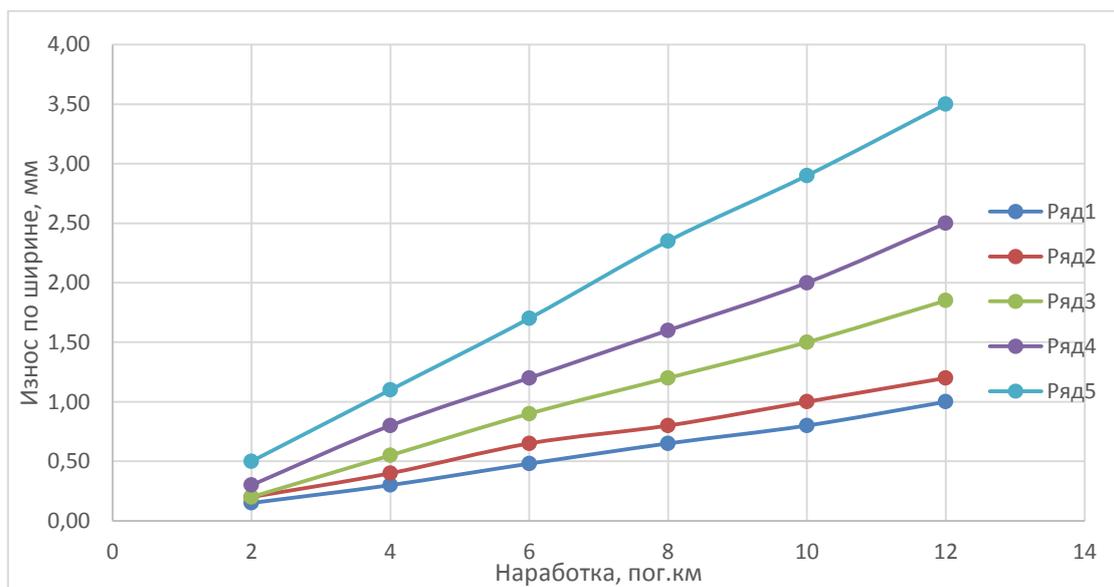


Рис. 2. Динамика износа фрагментов лезвий при различной толщине покрытия: 1 — $h_a = 1,8$ мм; 2 — $h_a = 1,4$ мм; 3 — $h_a = 1,0$ мм; 4 — $h_a = 0,5$ мм; 5 — без покрытия (материал основы — сталь 65Г)

На рис. 3 приведена схема профиля биметаллического лезвия в начале испытаний и в момент стабилизации профиля, условно изображенного прямыми участками $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ при смещении кромки лезвия от оси симметрии x на величину Δ .

При условии самозатачивания интенсивность изнашивания основного и упрочняющего слоев должна быть одинаковой, что обеспечивает эквидистантность профилей $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ (рис. 3).

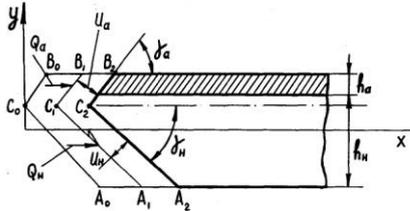


Рис. 3. Схема стабилизированного профиля биметаллического лезвия

При допущении, не влияющем из-за малой толщины слоев на результаты проведенного анализа, криволинейные стабилизированные профили были заменены отрезками прямых.

Тогда износ лезвия $U = C_1 C_2$ связан с износом армирующего U_a и несущего U_n слоев выражениями:

$$U_l = \frac{U_a}{\sin j_a}; U_n = \frac{U_n}{\sin j_n}. \quad (8)$$

Значения углов j_a и j_n получаем по результатам испытаний лезвий на машине ВЧ, заменяя криволинейный профиль прямой линией, не касающейся точек у кромки и в переходной зоне лезвия.

Износ основного U_n и армирующего U_a слоев определяется по известным выражениям [3]:

Литература

1. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
2. Ткачев В.Н. Методы повышения долговечности деталей машин. М.: Машиностроение, 1971. 272 с.
3. Рабинович А.Ш. Элементарная теория и метод проектирования самозатачивающихся лезвий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1961. № 10. С. 24–27.
4. Винокуров В.Н., Малов А.К. О надежности лесопосадочных машин // Лесное хозяйство. 1980. № 6. С. 45–47.
5. Королев В.Н., Осмачко А.П. и др. Ремонт сошников лесопосадочных машин // Техника в сельском хозяйстве. 1982. № 5. С. 22–24.
6. Кретинин В.И. Повышение долговечности рабочих органов лесопосадочных машин газопламенным напылением при ремонте: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Л., 1990. 19 с.
7. Кретинин В.И., Марков В.А., Соколова В.А., Марков А.Н. Теоретические предпосылки повышения долговечности почворежущих деталей при упрочнении. // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2017. Вып. 219. С. 156–160.
8. Кретинин В.И., Марков В.А., Соколова В.А., Марков А.Н., Трофимов А.В. Общие принципы управления качеством газопламенных покрытий при ремонте деталей // Системы Методы Технологии. 2016. № 2 (30). С. 79–83.
9. Markov V.A., Sokolova V.A., Kretinin V.I. Assessing the Impact Strength of Blade Edges of Forestry Machinery Operating Components // Lecture Notes in Mechanical Engineering,

$$U_n = \frac{C \cdot Q_n \cdot \sin j_n}{U_n^{-1} \cdot h_n}; U_a = \frac{C \cdot Q_a \cdot \sin j_a}{U_a^{-1} \cdot h_a}, \quad (9)$$

где Q_n, Q_a — составляющие силы сопротивления почвы резанию, приходящиеся соответственно на несущий и армирующий слой; U_n^{-1}, U_a^{-1} — износостойкость соответствующих слоев; C — коэффициент, характеризующий абразивные свойства почвы; h_n и h_a — толщина несущего и армирующего слоя.

Принимая во внимание эквидистантность стабилизированных профилей биметаллических лезвий с данным соотношением h_a и h_n , а также U_a^{-1} и U_n^{-1} , можно записать:

$$U_l = \frac{C \cdot Q(a, n)}{U_{(a, n)}^{-1} (h_a + h_n)}. \quad (10)$$

С учетом формул (8) – (10) получим выражение для оценки износостойкости лезвия U_l^{-1} :

$$U_l^{-1} = \frac{U_n^{-1} \cdot h_n + U_a^{-1} \cdot h_a}{h_n + h_a}. \quad (11)$$

Выражение (11) свидетельствует о том, что износостойкость биметаллического лезвия подчиняется правилу аддитивности. Испытания на машине ВЧ подтвердили достоверность расчетов по зависимости (11).

Выводы. Исследование процесса абразивного изнашивания упрочненных почворежущих элементов показало, что износостойкость биметаллического лезвия определяется толщиной армирующего (упрочняющего) слоя. С увеличением толщины упрочняющего покрытия износостойкость лезвия возрастает. Для фрагментов лезвий из стали 65Г при $h_a = 1,2 \dots 1,4$ мм коэффициент относительной износостойкости составил $2,0 \dots 2,5$.

Таким образом, регулируя толщину упрочняющего покрытия, мы можем прогнозировать ресурс рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering // ICEI. 2018. № 83. P. 7–844.

10. Кретинин В.И. Прогнозирование ресурса рабочих органов лесохозяйственных машин / СПбГЛТУ // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы междунар. науч.-технической конф. СПб., 2019. С. 358–360.
11. Belenkii Yu.I., Retina V.I., Sokolova V.A., Andronov A.V. Rationale for the choice of wear-resistant coatings in the hardening of tillage working bodies of forestry machines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Published under licence by IOP Publishing Ltd. :IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2019. № 315. С. 51–57.

References

1. Tkachev V.N. Wear and increase of durability of children of agricultural machines. M.: Mashinostroenie, 1971. 264 p.
2. Tkachev V.N. Methods for increasing the durability of machines parts. M.: Mashinostroenie, 1971. 272 p.
3. Rabinovich A.SH. Elementary theory and method of designing self-sharpening blades // Tractors and Agricultural Machinery. 1961. № 10. P. 24–27.
4. Vinokurov V.N., Malov A.K. On the reliability of logging machines // Lesnoe hozyajstvo. 1980. № 6. P. 45–47.
5. Korolev V.N., Osmachko A.P. i dr. Repair of ploughshares of forest-planting machines // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 1982. № 5. P. 22–24.

6. Kretinin V.I. Increasing the durability of working bodies of forest planting machines by gas-flame spraying during repair: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1990. 19 p.
7. Kretinin V.I., Markov V.A., Sokolova V.A., Markov A.N. Theoretical prerequisites for increasing the long-life of soil-cutting parts during hardening. // Izvestia SPbLTA. 2017. Vyp. 219. P. 156–160.
8. Kretinin V.I., Markov V.A., Sokolova V.A., Markov A.N., Trofimov A.V. General principles of controlling the quality of gas-flame coatings when repairing parts // Systems. Methods. Technologies. 2016. № (30). P. 79–83.
9. Markov V.A., Sokolova V.A., Kretinin V.I. Assessing the Impact Strength of Blade Edges of Forestry Machinery Operating Components // Lecture Notes in Mechanical Engineering, Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering // ICEI. 2018. № 83. P. 7–844.
10. Kretinin V.I. Forecasting the resource of working bodies of forestry machines / SPbGLTU // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. SPb., 2019. P. 358–360.
11. Belenkii Yu.I., Retina V.I., Sokolova V.A., Andronov A.V. Rationale for the choice of wear-resistant coatings in the hardening of tillage working bodies of forestry machines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Published under licence by IOP Publishing Ltd.: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2019. № 315. P. 51–57.