

Обоснование выбора износостойких покрытий при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов лесохозяйственных машин

В.И. Кретинин^a, В.А. Соколова^b, В.А. Марков^c, А.В. Теппоев^d, С.В. Алексеева^e

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, ^e pum222@mail.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>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Статья поступила 10.04.2020, принята 28.04.2020

В статье фокусируется внимание на проблеме повышения долговечности почвообрабатывающих рабочих органов. Рабочие органы почвообрабатывающих машин при эксплуатации находятся в тяжелых условиях абразивного изнашивания. В этой связи рассматриваются вопросы взаимодействия почворежущих элементов лесохозяйственных машин с почвой и древесно-кустарниковой растительностью. В настоящее время широко исследованы различные способы и материалы при упрочнении почворежущих элементов. Авторами обосновывается утверждение о том, что при выборе износостойких покрытий при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов необходимо учитывать состав и физико-механические свойства почвы. Раскрыта методика выбора износостойких покрытий в зависимости от твердости абразивных частиц почвенной массы. При выборе износостойких покрытий необходимо учитывать динамические нагрузки и прочность сплава. В ходе исследования обосновывается предположение о том, что поверхности почворежущих деталей, соприкасающихся с абразивной средой, необходимо упрочнять твердосплавным материалом, твердость которого должна быть не ниже 0,8 твердости абразива, т. е. не ниже 8 800 МПа. Такими характеристиками обладают самофлюсующиеся сплавы на основе никеля. По результатам экспериментальных исследований при упрочнении почворежущих элементов можно утверждать, что эти сплавы после оплавления образуют практически беспористую многофазовую структуру. Наличие в структуре составляющих (боридов и карбидов) твердостью около 11 ГПа обеспечивает покрытие значительную абразивную износостойкость, и они могут рекомендоваться при упрочнении рабочих органов лесохозяйственных машин газопламенным напылением износостойких покрытий из самофлюсующихся сплавов.

Ключевые слова: почворежущий элемент; абразивный износ; упрочняющее покрытие; твердость материала.

Justification for the selection of wear-resistant coatings during hardening of tillage working bodies of forestry machines

V.I. Kretinin^a, V.A. Sokolova^b, V.A. Markov^c, A.V. Teppoev^d, S.V. Alekseeva^e

St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutskiy Per., St. Petersburg, Russia

^a KVI_1960@mail.ru, ^b sokolova_vika@inbox.ru, ^c mactor85@mail.ru, ^d avt01@inbox.ru, ^e pum222@mail.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>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Received 10.04.2020, accepted 28.04.2020

The article focuses on the problem of increasing the durability of tillage working bodies. Working bodies of tillage machines in operation are in severe conditions of abrasive wear. This article discusses the interaction of soil-cutting elements of forestry machines with soil and wood-shrub vegetation. Currently, various methods and materials for strengthening soil-cutting elements are widely studied. The authors substantiate the claim that the composition and physical and mechanical properties of the soil must be taken into account when choosing wear-resistant coatings for strengthening tillage working bodies. The method of selecting wear-resistant coatings depending on the hardness of the abrasive particles of the soil mass is disclosed. When choosing wear-resistant coatings, it is necessary to take into account the dynamic loads and strength of the alloy. The study substantiates the assumption that the surfaces of soil-cutting parts in contact with the abrasive medium must be hardened with carbide material, the hardness of which should be not less than 0.8 hardness of the abrasive, i.e. not less than 8 800 MPa. Self-fluxing nickel-based alloys possess these characteristics. According to the results of experimental studies during hardening of soil-cutting elements, it can be argued that these alloys form a practically non-porous multiphase structure after fusion. The presence of constituents (borides and carbides) with a hardness of about 11 GPa in the structure provides significant abrasion resistance to the coating, and they can be recommended when hardening the working bodies of forestry machines by flame spraying of wear-resistant coatings of self-fluxing alloys.

Keywords: soil cutting element; abrasive wear; reinforcing coating; hardness of material.

Введение. 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. Наблюдения показывают, что почворежущие детали либо эксплуатируются при неудовлетворительных показателях работ, либо многократно подвергаются ремонту и частой замене [1]. Одним из наиболее эффективных путей повышения долговечности режущих рабочих органов лесохозяйственных машин, взаимодействующих с почвой и древесно-кустарниковой растительностью, является использование их биметаллической рабочей части, позволяющей реализовать эффект самозатачивания. По сравнению со стандартными, ресурс таких деталей увеличивается в 2–3 раза [2].

Цель исследования. Теоретически обосновать выбор материала покрытий при упрочнении почворежущих

деталей рабочих органов лесохозяйственных машин газопламенным напылением.

Методика исследования. Особенности условий эксплуатации почвообрабатывающих машин и орудий в лесном хозяйстве существенно влияют на долговечность их основных узлов и деталей, особенно на ресурс рабочих органов (лемехов, ножей, дисков) и на срок службы машин и орудий в целом. По этой причине фактический срок службы большинства лесохозяйственных машин составляет 2–4 года (при назначенном 7–8 лет). В связи с этим возникает необходимость изыскания путей повышения ресурса рабочих органов лесохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного износа и ударных нагрузок, что в особенности характерно для почв Северо-Западного региона. В зависимости от состава и физико-механических свойств, почвы оказывают различное изнашивающее воздействие на детали почвообрабатывающих, посадочных машин (табл. 1) [3].

В работе [4] отмечается, что на лесных почвах, содержащих щебнисто-каменистые включения, износ почворежущих деталей возрастает более чем в 3 раза, а это, следовательно, ведет к увеличению расхода запасных частей.

Таблица 1. Изнашивающая способность почв

Название почв по механическому составу	Содержание физической глины (фракции 0,01 мм), %	Почвы, не содержащие каменных включений	Почвы, содержащие химические включения			
			Почвы, содержащие мелкие каменные включения	Содержание камней		
				до 20 м ³ /га	до 35 м ³ /га	свыше 35 м ³ /га
Глинистые	50	0,32	1,46	4,59	5,9	7,44
Тяжелосуглинистые	50–40	0,5	2,4	4,4	5,8	7,17
Среднесуглинистые	40–30	0,82	2,86	4,24	5,59	6,95
Легкосуглинистые	30–20	1,53	4,0	4,2	5,48	6,84
Супесчаные	20–10	1,86	3,83	4,04	5,4	6,75
Песчаные	10–3	2,42	3,38	3,94	5,3	6,69

Наблюдения за изнашиванием почворежущих деталей показывают, что износ происходит в результате режущего или скользящего действия твердых частиц почвы.

При изучении абразивного износа М.М. Хрущовым и М.А. Бабичевым установлена зависимость между износом лезвия по ширине и наработкой:

$$dU = c * q * dL, \quad (1)$$

где U — линейный износ; L — путь трения почвы по участку поверхности лезвий; q — нормальная компонента давления; c — коэффициент изнашивания, зависящий от абразивности почвы и износостойкости материала лезвия.

Для чистых металлов и отожженных сталей зависимость интенсивности изнашивания от твердости следующая:

$$\frac{dU}{dL} = \frac{c * q}{H_M}, \quad (2)$$

где H_M — твердость материала.

Для термически обработанных сталей (нормальная закалка и отпуск):

$$\frac{dU}{dL} = \frac{c * q}{(1 - \beta)H_0 + \beta H_M}, \quad (3)$$

где H_0 — твердость отожженной стали; β — безразмерный коэффициент, зависящий от состава стали и имеющий значение от 0 до 1,0.

Абразивный износ металлов в большей степени зависит от природы абразивных частиц и условий их воздействия на поверхность металла.

В общем случае износ связан гиперболической зависимостью с твердостью материала (рис. 1) [5; 6]. Однако при наличии динамических нагрузок эта зависимость может нарушаться, так как при увеличении твердости увеличивается хрупкость сплава.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами разрушение металла может происходить путем микрорезания, многократной пластической деформации поверхности трения и коррозионно-механического изнашивания. Экспериментально установлено, что механизм абразивного износа определяется главным образом соотношением значений твердости материала H_M и твердости H_a абразивных частиц [7]. При $H_M \ll H_a$ наблюдаются микрорезание и интенсивная пластическая деформация поверхностей трения. При более высокой твердости сплава процесс разрушения протекает в основном за счет коррозионно-

механического истирания или хрупкого разрушения. В реальных условиях работы почвопорежущих деталей все виды износа в той или иной мере проявляются одновременно. Однако износостойкость определяется каким-то одним видом изнашивания, доминирующим в конкретных условиях работы.

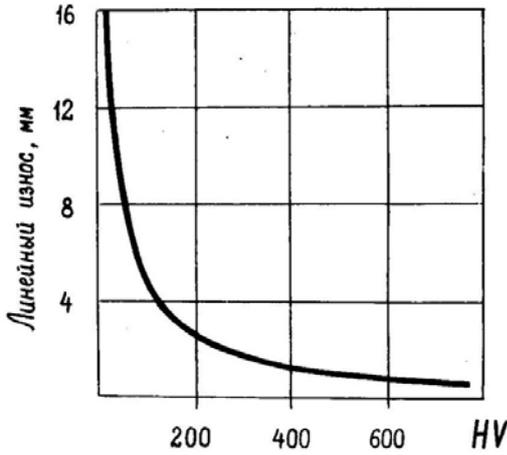


Рис. 1. Зависимость абразивного износа от твердости материала

Зависимость износостойкости от твердости материала в общем случае определяется следующим математическим выражением:

$$\varepsilon = b * H^n, \quad (4)$$

где ε — относительная износостойкость материала; b — коэффициент, зависящий от интенсивности износа; H — твердость материала; n — показатель степени, зависящий от соотношения значений твердости абразивных частиц и материала.

При малых значениях твердости материала ($H_a \gg H_m$) имеет место микрорезание, и износостойкость пропорциональна первой степени твердости ($n = 1$). При больших значениях твердости материала ($H_a \approx H_m$), когда глубина внедрения абразивных частиц меньше, имеет место пластическое отеснение, или коррозионно-механическое истирание ($n > 1$).

Результаты исследований. При выборе износостойких покрытий для упрочнения и восстановления применительно к условиям эксплуатации рабочих органов лесохозяйственных машин необходимо учитывать динамические нагрузки и прочность сплава. В этом случае математическое выражение оптимальной твердости сплава принимает следующий вид:

$$H_{\text{опт}} = 0,8H_a * k_d * k_n, \quad (5)$$

где: H_a — твердость абразивных частиц; k_d — коэффициент динамичности нагружения (для почв средней твердости, не содержащих каменных включений $k_d = 1$); k_n — коэффициент прочности сплава.

С учетом динамичности нагрузки зависимость износостойкости материала от твердости может иметь четыре основные разновидности (рис. 2).

а) При $H_a \gg H_m, n = 1$. В этом случае зависимость имеет вид, установленный М.М. Хрущовым и М.А. Бабичевым [6].

б) При $H_a \approx H_m, n > 1$. Кривая только на участке А имеет прямолинейный характер. Степенной вид кривой участка В обусловлен изменением механизма разрушения металла, который соответствует коррозионно-механическим явлениям.

в) При $H_a \approx H_m, n > 1, k_d < 1$. Особенностью данной зависимости является вначале плавное, а затем скачкообразное нарастание износостойкости с последующим крутым падением. Это обусловлено тем, что с увеличением твердости сплава наступает его хрупкое разрушение.

г) При $H_a \approx H_m, n = 1, k_d \ll 1$. В этом случае прямолинейный участок кривой при определенных значениях твердости сплава переходит в крутую ниспадающую линию, обусловленную хрупким разрушением сплава.

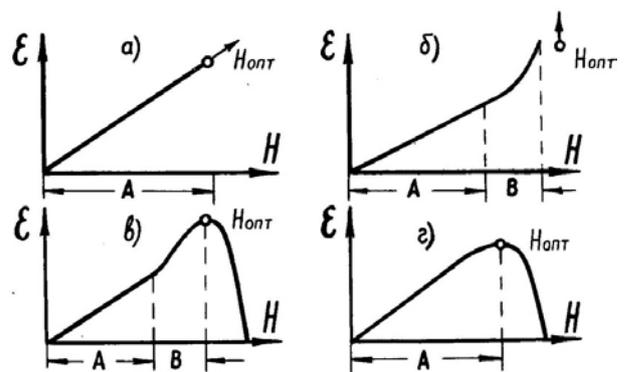


Рис. 2. Зависимости износостойкости материала от его твердости

На основании рассмотренных положений оптимальная твердость сплавов зависит от условий износа.

При истирании сплавов в абразивной среде ($k_d = 1$) твердость их может ограничиваться только технологическими факторами. Если деталь не испытывает существенных нагрузок, то обычно чем выше твердость, тем больше в сплаве карбидов, тем долговечнее материал.

При наличии ударных нагрузок оптимальная твердость ограничивается прочностью материала. В этих условиях необходимо повышать вязкость сплава. Детали почвообрабатывающих машин изготавливаются из углеродистых сталей с содержанием углерода 0,4–0,7 % или из стали 60Г, 65Г, и твердость их после термообработки не превышает 7 000 МПа. Твердость же абразивных частиц почвы значительно выше и составляет 11 000 МПа (см. табл. 2). Поэтому поверхности почвопорежущих деталей, соприкасающихся с абразивной средой, необходимо упрочнять твердосплавным материалом, твердость которого должна быть не ниже 0,8 твердости абразива, т. е. не ниже 8 800 МПа.

Таковыми характеристиками обладают самофлюсующиеся сплавы на основе никеля. Проведенные исследования [8–11] и металлографический анализ показывают, что самофлюсующийся сплав ПР-Н70Х17С4Р4 после оплавления образует практически беспористую многофазовую структуру. Наличие в структуре составляющих (боридов и карбидов) твердостью около 11 ГПа позволяет покрытию обладать значительной абразивной износостойкостью [12–14].

Таблица 2. Микротвердость минеральных частиц почвы и структурных составляющих износостойких сплавов

Наименование материала	Микротвердость, МПа
Кварц	11 000–11 300
Полевые шпаты	6 900–7 200
Гранит	8 200
Гранаты	7 500–9 000
Эпилот	7 200
Карбиды железа	8 000
Карбиды молибдена	14 900
Карбиды хрома	15 700
Карбиды бора	28 000–35 000
Бориды хрома	15 000–24 000
Карбиды вольфрама	24 000
Карбиды марганца	7 700
Сложные карбиды железа и хрома	11 000–12 500

Литература

1. Винокуров В.Н. Механизация — решающее звено концепции развития лесного хозяйства // Лесное хозяйство. 1989. № 8. С. 15–19.
2. Калинин Н.П., Силаев Г.В., Шапкин О.М. Организация и технология лесохозяйственных работ. М.: Агропромиздат, 1986. 280 с.
3. Корниенко П.П., Сериков Ю.М. Механизация обработки почвы под лесные культуры. М.: Агропромиздат, 1987. 247 с.
4. Быков В.Ф. Влияние корненасыщенности и каменистости почв на износ рабочих органов лесных культиваторов // Труды МЛТИ. 1976. Вып. 88. С. 108–111.
5. Клейс И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания // Трение и износ. 1980. № 2. С. 263–277.
6. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Износостойкость и структура твердых наплавов. М.: Машиностроение, 1971. 95 с.
7. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов: справ. пособие. К.: Техника, 1989. 128 с.
8. Кретинин В.И. Повышение долговечности рабочих органов лесопосадочных машин газопламенным напылением при ремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: 1990. 19 с.
9. Кретинин В.И., Марков В.А., Соколова В.А., Марков А.Н. Теоретические предпосылки повышения долговечности почворезущих деталей при упрочнении // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2017. Вып. 219. С. 156–160.
10. Лазаренко Г.П. Прогнозирование условий напыления газотермических покрытий с заданной толщиной и волнистостью // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 1983. № 7. С. 102–108.
11. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардаговская Е.Н. Газотермические покрытия порошковых материалов: справ. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
12. Линник В.А., Пекшев П.Ю. Современная техника газотермического нанесения покрытий. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
13. Ged' O V.M., Markov V.A., Sokolova V.A., Parfenopolo G.K., Chernyh L.G. Research of composite coverings wear resistance for forestry machines by electro contact sintering: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Выводы. При выборе износостойкого покрытия и способа упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов лесохозяйственных машин необходимо учитывать многочисленные факторы. К числу наиболее существенных относятся:

- 1) условия работы детали (давление на рабочую поверхность, ударные нагрузки и т. д.);
- 2) материал детали, химический состав и физико-механические свойства;
- 3) геометрические размеры и конфигурация рабочей поверхности;
- 4) возможность исключения механической обработки;
- 5) возможность получения металлопокрытия с заданными служебными свойствами, простота технологии и экономичность работ.

Применение самофлюсующихся сплавов при упрочнении рабочих органов лесохозяйственных машин позволяет наносить покрытия необходимой толщины газопламенным способом на поверхности сложной конфигурации с заданными физико-механическими свойствами и не требует значительных затрат при внедрении в производство.

- 102, Development, Research, Certification. 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification». 2018. P. 012023.
14. 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 (ICIE 2018). P. 837–844.

References

1. Vinokurov V.N. Mechanization is a crucial link in the concept of forestry development // Lesnoe hozaystvo. 1989. № 8. P. 15–19.
2. Kalinichenko N.P., Silaev G.V., SHapkin O.M. Organization and technology of forestry operations. M.: Agropromizdat, 1986. 280 p.
3. Kornienko P.P., Serikov YU.M. Mechanization of tillage for forest crops. M.: Agropromizdat, 1987. 247 p.
4. Bykov V.F. The influence of root saturation and stony soil on the wear of the working bodies of forest cultivators // Trudy MLTI. 1976. Vyp. 88. P. 108–111.
5. Klejs I.R. Fundamentals of the choice of materials for work in conditions of gas-abrasive wear // Journal of Friction and Wear. 1980. № 2. P. 263–277.
6. Hrushchov M.M., Babichev M.A. Wear resistance and structure of hard surfacing. M.: Mashinostroenie, 1971. 95 p.
7. Dobrovolskij A.G., Koshelenko P.I. Abrasive Wear Resistance of Materials: sprav. posobie. K.: Tekhnika, 1989. 128 p.
8. Kretinin V.I. Improving the durability of the working bodies of forest planting machines by flame spraying during repair: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: 1990. 19 p.
9. Kretinin V.I., Markov V.A., Sokolova V.A., Markov A.N. Theoretical prerequisites for increasing the durability of soil-cutting parts at hardening // Izvestia SPbLTA. 2017. Vyp. 219. P. 156–160.
10. Lazarenko G.P. Prediction of spraying conditions for thermal spray coatings with a given thickness and waviness // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 1983. № 7. P. 102–108.
11. Borisov YU.S., Harlamov YU.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. Thermal coatings of powder materials: sprav. Kiev: Naukova dumka, 1987. 544 p.

12. Linnik V.A., Pekshev P.YU. Modern gas thermal coating technology. M.: Mashinostroenie, 1985. 128 p.
13. Ged'O V.M., Markov V.A., Sokolova V.A., Parfenopolo G.K., Chernyh L.G. Research of composite coverings wear resistance for forestry machines by electro contact sintering: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 102, Development, Research, Certification. 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification». 2018. P. 012023.
14. 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 (ICIE 2018). P. 837–844.