

О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

THE INFLUENCE OF HARDENING ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF SOIL-CUTTING TOOLS

Б.А. МАРКОВ¹, к.т.н.
О.В. СЕДЫХ¹
В.В. БОНДАРЕНКО²

¹ НИИ ЛГТУ, Липецк, Россия
² ООО НПП «ВАЛОК», Липецк, Россия, valok.lesnaya@mail.ru

B.A. MARKOV¹, PhD in Engineering
O.V. SEDYKH¹
V.V. BONDARENKO²

¹ Research Institute of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia
² Scientific and Production Enterprise VALOK, Lipetsk, Russia, valok.lesnaya@mail.ru

В настоящее время почворежущий инструмент изготавливается в основном из углеродистых сталей, которые подвергают термообработке для обеспечения высокой твердости и прочности. Однако стойкость такого упрочненного почворежущего инструмента как отечественных, так и иностранных производителей оставляет желать лучшего.

Одной из причин недостаточной стойкости против абразивного износа почворежущего инструмента, подвергнутого упрочнению путем термообработки, может являться его нагрев силой трения при контакте с почвой. В результате такого нагрева сталь подвергается дополнительному отпуску, приводящему к уменьшению твердости поверхности режущей кромки инструмента почти в 2 раза – с 49–50 HRC до 22–34 HRC в зависимости от интенсивности нагрева металла. Данное обстоятельство было установлено при металлографических исследованиях образцов, вырезанных из лемехов корпуса КБ-01 плуга ПБС-4.

Одним из путей решения данной проблемы является получение на поверхности почворежущего инструмента износостойкого слоя, не подверженного отрицательному воздействию повторного нагрева в процессе эксплуатации, например, из легированного белого чугуна методом плазменно-порошковой наплавки. Проведенными металлографическими исследованиями было установлено, что наплавленный слой имеет твердость более 62 HRC. При этом такие виды термообработки, как закалка, нормализация или отжиг, не оказывают заметного влияния на твердость наплавленного слоя.

Металлографические исследования наплавленного металла после эксплуатации также показали отсутствие заметных изменений его микроструктуры и твердости. Это свидетельствует о том, что повторный нагрев от действия сил трения не оказывает существенного влияния на свойства почворежущего инструмента, упрочненного плазменно-порошковой наплавкой, что способствует повышению его длительности эксплуатации.

Ключевые слова: почворежущий инструмент, режущая кромка, абразивный износ, закалка, отпуск, плазменно-порошковая наплавка.

Для цитирования: Марков Б.А., Седых О.В., Бондаренко В.В. О влиянии упрочнения на эксплуатационные свойства почворежущего инструмента // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 2. С. 45–51. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-45-51.

Today, soil cutting tools are mainly made from carbon steels, which are heat treated to provide high hardness and strength. However, at present, the durability of such a hardened soil-cutting tool of both domestic and foreign manufacturers is far from perfect.

One of the reasons for the insufficient resistance to abrasive wear of a soil-cutting tool subjected to hardening by heat treatment may be its heating by frictional force in contact with the soil. As a result of such heating, the steel undergoes additional tempering, which leads to a decrease in the surface hardness of the cutting edge of the tool by almost 2 times – 49–50 HRC to 22–34 HRC, depending on the intensity of metal heating. This circumstance was established during metallographic studies of samples cut from the shares of the KB-01 body of the PBS-4 plow.

One of the ways to solve this problem is to obtain a wear-resistant layer on the surface of the soil-cutting tool, which is not subject to the negative effects of reheating during operation, for example, from alloyed white cast iron by the method of plasma-powder surfacing. Metallographic studies showed that the deposited layer has a hardness of more than 62 HRC. At the same time, such types of heat treatment as hardening, normalization or annealing do not have a noticeable effect on the hardness of the deposited layer.

Metallographic studies of the deposited metal after operation also showed the absence of noticeable changes in its microstructure and hardness. This indicates that reheating from the action of friction forces does not have a significant effect on the properties of a soil-cutting tool strengthened by plasma-powder surfacing, which contributes to an increase in its duration of operation.

Keywords: soil cutting tool, cutting edge, abrasive wear, hardening, tempering, plasma-powder surfacing.

Cite as: Markov B.A., Sedykh O.V., Bondarenko V.V. The influence of hardening on the operational properties of soil-cutting tools. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 2, pp. 45–51 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-45-51.

Актуальность проблемы

В настоящее время почворезущий инструмент изготавливается в основном из углеродистых сталей. При этом основным видом термообработки такого инструмента является объемная закалка, которая на относительно тонкостенных деталях (толщиной до 12 мм) позволяет получить твердость 40–55 HRC как на поверхности, так и по всему объему.

Поскольку абразивное изнашивание зависит от давления и соотношения твердости материала и абразивных частиц, то твердость металла определяет основную эксплуатационную характеристику почворезущего инструмента – износостойкость. Известно, что чем больше твердость поверхности, тем выше ее стойкость против абразивного износа [1].

Но, несмотря на обеспечение, казалось бы, оптимальных эксплуатационных свойств, полученных после термообработки, стойкость почворезущего инструмента как отечественных, так и иностранных производителей оставляет желать лучшего. Так, например, наработка плугов ПБС составляет всего 30–60 га [2].

Цель исследований

Выяснение причин недостаточной эксплуатационной стойкости почворезущего инструмента и определение путей ее повышения.

Постановка задачи исследований

Очевидно, что одной из причин интенсивного абразивного износа почворезущего инструмента является то обстоятельство, что при его изготовлении и эксплуатации не учитываются в полной мере те процессы, которые протекают при контакте этого инструмента с почвой; в частности, нагрев от действия сил трения.

Известно, что в процессе закалки стали образуется мартенсит – основная структура закаленной стали, представляющая собой упорядоченный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железе [3].

Мартенситное превращение – бездиффузионное (сдвиговое превращение), атомы перемещаются с большой скоростью по сдвиговому механизму. При этом ОЦК кристаллическая решетка сильно искажается, превращаясь из кубической в тетрагональную [3], имеющую форму прямоугольного параллелепипеда, в котором атомы железа расположены в вершинах и центре ячейки, атомы углерода – в объеме ячеек.

Мартенситная структура – неравновесная, и в ней есть большие внутренние напряжения (напряжения второго рода), что в значительной степени определяет высокую твердость стали после закалки. Однако это напряженное состояние металла может быть изменено термообработкой, например отпуском. Нагрев закаленной детали ниже критической точки A_{c1} , выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение, производимые при отпуске, позволяют снизить внутренние напряжения и тем самым уменьшить твердость детали, повысить ее пластичность при сохранении приемлемого уровня прочности. При этом структура отпущенной стали формируется в период выдержки при температуре отпуска, последующая скорость охлаждения не влияет на структурное состояние стали [3].

Таким образом, закалка и отпуск, проведенные на заводе-изготовителе почворезущего инструмента, позволяют придать металлу высокую твердость и прочность и обеспечить требуемый уровень пластичности, необходимый для предотвращения хрупких разрушений при наезде на случайные препятствия (камни и т.п.).

Однако длительная работа почворезущего инструмента в такой абразивной среде, как почва, неминуемо приведет к нагреву металла и, как следствие, к его дополнительному отпуску, уменьшению твердости и снижению износостойкости.

Для проверки данного предположения было необходимо провести металлографические исследования образцов почворезущего инструмента, подвергнутого термическому воздействию в процессе эксплуатации.

Объект исследований

Объектом исследования являлись корпуса КБ-01 плуга ПБС-4. Плуги этой серии предназначены для обработки почв на глубину от 16 до 35 см с удельным сопротивлением до 0,09 МПа (твердость почвы до 4 МПа) и влажностью до 30 % под все сельскохозяйственные культуры при скоростях обработки почвы до 12 км/ч (3,33 м/с) [2, 4].

Преимущество этих плугов заключается в низком тяговом сопротивлении, которое достигается за счет принципиально новой конструкции отвальных и безотвальных рабочих органов [2].

Корпус КБ-01, применяемый на плугах ПБС (рис. 1), имеет стойку I , вертикальный

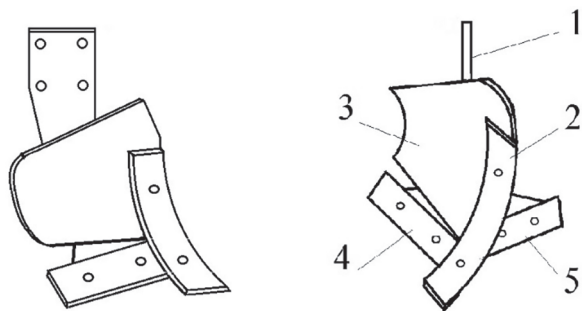


Рис. 1. Корпус КБ-01 в сборе:

1 – стойка, 2 – вертикальный сферический нож (вертикальный лемех), 3 – отвал, 4 – правый лемех, 5 – левый лемех

Fig. 1. KB-01 body assembled:

1 – stand; 2 – vertical spherical knife (vertical share); 3 – blade; 4 – right share; 5 – left share

нож (вертикальный лемех) 2, отвал 3 и два горизонтальных лемеха: правый 4 и левый 5. Все названные лемеха оборотные (двухсторонние).

При работе вертикальный нож 2 гранью своего полевого обреза разделяет отрезаемый корпусом пласт почвы (по ширине) в соотношении 5:2. Три части приходится на нож 2 и лемех 4, а две меньшие части – на лемех 5. Нижняя часть вертикального лемеха выполняет функцию клина с малым углом, который отрезает пласт. Верхняя часть пласта ножом и отвалом (в зоне его действия) поднимается, крошится и отбрасывается в правую сторону в борозду предыдущего корпуса. Таким образом, оборачивается только верхний слой почвы, а глубже, до 30 см, выполняется рыхление с подрезанием корневых остатков. Такие корпуса, по сравнению с известными, обеспечивают хорошее качество вспашки, повышение производительности на 20–30 % [4], при этом экономия дизельного топлива составляет 6–9 кг на каждый гектар обработанной пашни [2].

Металлографическим исследованиям подвергались образцы, вырезанные из левых лемехов, изготовленных из стали 65Г и подвергнутых термообработке на заводе-изготовителе. Схема вырезки образцов показана на рис. 2.

Особенность левого лемеха состоит в том, что в процессе обработки почвы передняя часть его режущей кромки (по месту вырезки образцов № 1, рис. 2) защищена от действия почвы вертикальным (сферическим) ножом и с ней практически не контактирует. Поэтому на этом участке режущая кромка может наиболее полно сохранить исходную (после термо-

обработки на заводе-изготовителе) твердость и микроструктуру. Остальная часть режущей кромки левого лемеха, в том числе и по месту вырезки образца № 2 (по рис. 2), в процессе эксплуатации подвергается интенсивному абразивному износу.



Рис. 2. Схема вырезки образцов из левого лемеха

Fig. 2. Scheme of cutting samples from the left share

Материалы и методы

Исследованиям подвергались образцы, вырезанные из прошедших эксплуатацию лемехов (схема вырезки показана на рис. 2). Микроструктура и микротвердость металла, находящегося в исходном состоянии (не подвергнутого эксплуатации), определялись по образцам-свидетелям, упрочненным по технологиям, соответствующим упрочнению лемехов.

Приготовление микрошлифов для исследований производилось по обычной методике, включая следующие основные операции: вырезку образцов и подготовку поверхности, шлифование, полирование и травление [5].

Вырезка образцов производилась абразивными (отрезными) кругами с использованием ручного электроинструмента. Для устранения возможного влияния нагрева от действия абразивного инструмента на микроструктуру металла поверхность образцов, предназначенная для исследования, подвергалась шлифовке на плоскошлифовальном станке со съемом металла толщиной не менее 3 мм. В процессе шлифовки образцы подвергались жидкостному охлаждению.

После этого образцы подвергались полировке механическим методом; окончательная полировка проводилась на сукне с использованием пасты Гойя.

После полировки шлифы промывали в воде и сушили полированную поверхность фильтровальной бумагой.

Для выявления микроструктуры отполированная поверхность образцов подвергалась травлению в 3%-м спиртовом растворе HNO_3 .

Для изучения микроструктуры и определения структурного состава металла образцов использовался микроскоп EPIQUANT.

Измерение микротвердости выполнялось на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450–76 при нагрузке 1 Н, шаг замеров составлял 0,05–0,2 мм.

Определить твердость по Роквеллу непосредственным измерением оказалось затруднительно из-за недостаточной устойчивости образцов и опасности их опрокидывания в процессе измерения. Поэтому твердость в HV и HRC различных участков исследуемых сечений образцов была определена по измеренной их микротвердости с применением переводных таблиц.

Металлографические исследования проводились на лабораторной базе кафедры физического металловедения ФГБУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Результаты и обсуждение

В результате исследований было установлено, что твердость металла лемехов на участке № 1, защищенном от контакта с почвой вертикальным ножом, составляла порядка 322 HV (39 HRC) вблизи поверхности режущей кромки и 554 HV (49–50 HRC) – в середине сечения. Твердость металла лемехов на участке № 2, подвергавшегося интенсивному абразивному износу, составляла 224–338 HV (21,5–36 HRC), соответственно, вблизи поверхности режущей кромки и в середине сечения.

Увеличение твердости от поверхности детали к ее середине связано с неравномерностью нагрева детали: поверхность разогревалась от действия сил трения, а потом теплота распространялась вглубь детали.

Также с неравномерностью нагрева лемеха от сил трения связана и разница в твердости (почти в 1,38–1,5 раза) по длине режущей кромки одной и той же детали.

Пример микроструктуры металла лемеха на участке № 1 представлен на рис. 3. В центре образца структура состоит из троостомартенсита и аустенита остаточного с твердостью 49–50 HRC. Вблизи поверхности на глубину около 1000 мкм наблюдаются признаки отпуска стали, происшедшего уже в процессе работы лемеха. При этом исходная структура (из троостомартенсита и аустенита остаточного) переходит в троостит (на глубине 800–1000 мкм от поверхности) и троостосорбит – вблизи поверхности и на поверхности режущей кромки.

Пример микроструктуры металла лемеха на участке № 2 представлен на рис. 4, из которого следует, что отпуск стали произошел на большую глубину, чем на участке № 1, а в микроструктуре имеется феррито-перлитная смесь. Таким образом, можно заключить, что на данном участке лемеха температура нагрева режущей кромки в процессе его работы могла достигать 400–450 °С.

Таким образом, в процессе эксплуатации произошел дополнительный отпуск всей режущей кромки лемеха, особенно на участке, не защищенной от контакта с почвой вертикальным сферическим ножом (лемехом). Снижение твердости стали, произошедшее

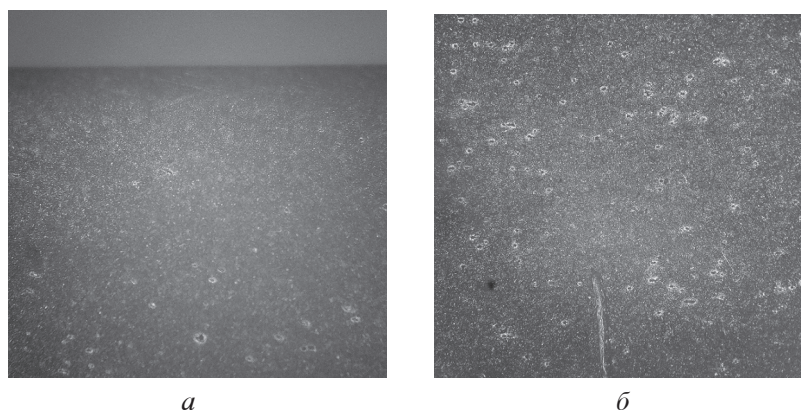


Рис. 3. Микроструктура образца № 1:

a – вблизи поверхности, $\times 100$; *b* – в центре, $\times 400$

Fig. 3. Sample microstructure № 1:

a – near the surface, $\times 100$; *b* – in the center, $\times 400$

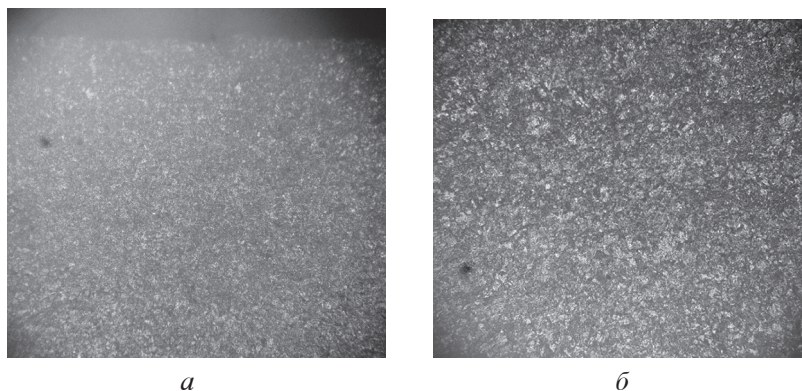


Рис. 4. Микроструктура образца № 2:
a – вблизи поверхности, $\times 100$; *б* – в центре, $\times 400$

Fig. 4. Microstructure of sample No. 2:
a – near the surface, $\times 100$; *b* – in the center, $\times 400$

вследствие данного отпуска, способствовало усилению абразивного износа лемеха и снижению его наработки.

Очевидно, что для повышения длительности эксплуатации почворежущего инструмента необходимо применение других методов упрочнения и материалов, не подверженных отрицательному воздействию нагрева в процессе эксплуатации.

Возможные пути решения проблемы

Известно ([1] и др.), что к материалам повышенной износостойкости, помимо сталей, относятся и белые чугуны. Одним из путей получения легированного белого чугуна на поверхности различного почворежущего инструмента является плазменно-порошковая наплавка (ППН) [6]. Этот способ позволяет получать наплавленные слои, имеющие высокую стойкость против абразивного износа [7], и обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики почворежущего инструмента [8].

Полевые испытания корпусов КБ-01 на плуге ПБС-4, проведенные в 2019 г. на ряде сельскохозяйственных предприятий Липецкой и Тамбовской областей, показали, что лемеха, подвергнутые упрочнению ППН по технологии ООО НПП «ВАЛОК», имеют наработку в несколько раз больше, чем аналогичные корпуса, не подвергнутые наплавке.

При металлографических исследованиях было установлено, что микроструктура наплавленного металла в исходном состоянии в основном состоит из заэвтектического белого чугуна (карбиды $(Cr, Fe)_7C_3$, имеющие форму шестигранной призмы, мартенситная матрица, аустенит остаточный) и доэвтектического чугуна

(толщина слоя около 150 мкм, микротвердость 4,1–4,6 ГПа) вблизи границы сплавления с основным металлом (сталью 09Г2С) (рис. 5, *a*).

Образование слоя доэвтектического чугуна связано с оплавлением поверхностного слоя основного металла, его частичному смешиванию с наплавляемым материалом и взаимной диффузией элементов между слоями, что приводит к уменьшению содержания углерода и легирующих элементов в этой зоне.

После термообработки (закалки, нормализации и отжига; во всех случаях температура нагрева образцов составляла 850–870 °С) микроструктура наплавленного металла так же в основном состояла из заэвтектического и эвтектического чугуна (рис. 5, *б–г*).

Причем, термообработка практически не оказывает заметного влияния на твердость поверхностного слоя из заэвтектического чугуна. Так, в исходном (после наплавки) состоянии твердость поверхности была более 62 HRC, после закалки в масло – 62–64,5 HRC, после нормализации – 59–65,5 HRC и после отжига – 52–65 HRC.

Наибольшее влияние термообработка оказала на твердость доэвтектического чугуна. При нагреве до температуры примерно 730 °С структура доэвтектического чугуна состояла из аустенита и ледебурита. При охлаждении после отжига аустенит превращался в перлит, после нормализации – в троосто-перлит, при закалке – в мартенсит, что и обуславливает разницу в твердости. Однако данный слой имеет небольшую толщину, расположен вблизи границы сплавления с основным металлом и не оказывает существенного влияния на износостойкость наплавленного слоя.

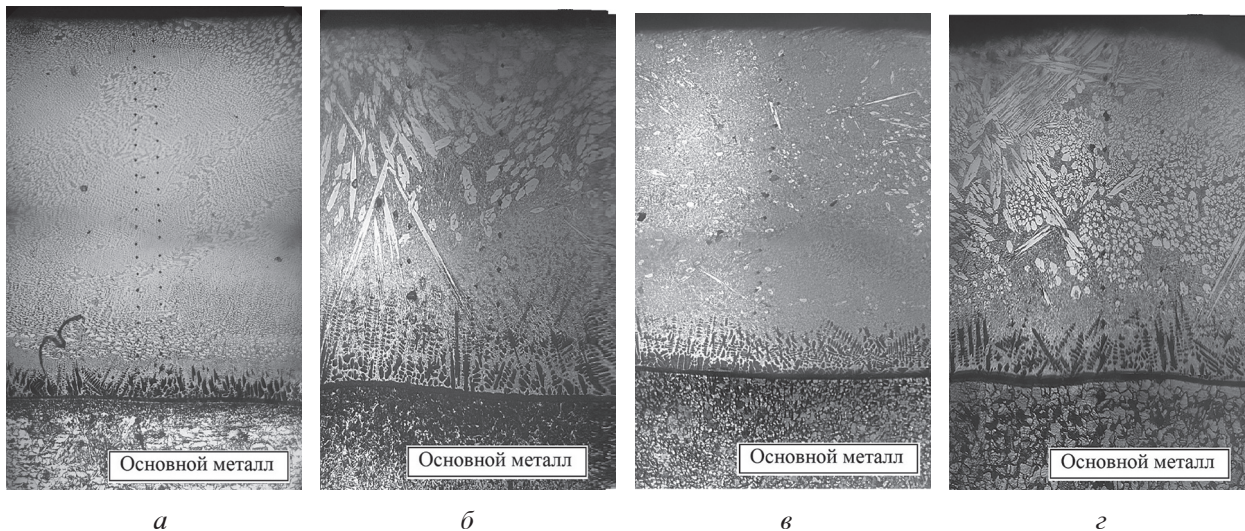


Рис. 5. Микроструктура наплавленного слоя:
a – в исходном состоянии (x100); *б* – после закалки (x100);
в – после нормализации (x100); *г* – после отжига (x100)

Fig. 5. Microstructure of the deposited layer:
a – in the initial state (x100); *b* – after quenching (x100);
c – after normalization (x100); *d* – after annealing (x100)

Металлографические исследования наплавленного металла после эксплуатации также показали отсутствие заметных изменений его микроструктуры и твердости.

Так, если до полевых испытаний средняя твердость наплавленного металла составляла около 1040 HV/69 HRC, то после испытаний – порядка 799 HV/64 HRC, что значительно выше твердости металла, упрочненного закалкой на заводе-изготовителе.

Это свидетельствует о том, что повторный нагрев от действия сил трения не оказывает существенного влияния на свойства почворезущего инструмента, упрочненного ППН, что способствует повышению его срока эксплуатации.

Выводы

1. Проведены металлографические исследования левого лемеха корпуса КБ-01 от плуга ПБС-4, прошедшего эксплуатацию. Установлено, что в процессе эксплуатации режущая кромка лемеха, особенно на участке, не защищенном от контакта с почвой вертикальным сферическим ножом (лемехом), подверглась отпуску из-за нагрева от силы трения. При этом твердость режущей кромки снизилась с 49–50 HRC (твердость в центре детали на участке, защищенном от действия силы трения) до 22–34 HRC.

2. Проведены исследования слоя, наплавленного плазменно-порошковой наплавкой по технологии ООО НПП «ВАЛЮК» на сталь 09Г2С. Установлено, что структура наплавленного слоя в основном состоит из заэвтектического белого чугуна, имеющего твердость более 62 HRC. Нагрев наплавленного металла до температур 850–870 °С практически не влияет на его твердость, что позволяет проводить термообработку (закалку, нормализацию или отжиг) лемехов после их наплавки.

3. В процессе эксплуатации корпусов КБ-01 нагрев от сил трения не оказывает существенного влияния на твердость металла, наплавленного ППН по технологии ООО НПП «ВАЛЮК», что позволяет значительно (в 2–4 раза) повысить длительность эксплуатации упомянутых корпусов.

Литература

1. Жарский И.М. и др. Материаловедение: учебное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2015. 557 с.
2. Плуги ПБС (ПБС-4, ПБС-5, ПБС-8). Услуги и продукция. АО «РАЦИО». URL: <http://ratio34.ru/services-and-products/plows-mounted-universal-pbs-4-pbs-5-pbs-8/> (дата обращения: 07.12.2019).
3. Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К., Климов В.Н. Материаловедение в машиностроении: учебник для бакалавров. М.: Издательство Юрайт, 2015. 535 с.

4. Плуги серии ПБС. URL: <https://agri-tech.ru/info/cat1/page29.html> (Дата обращения: 07.12.2019).
 5. Материаловедение: учебное пособие / под ред. А.Г. Багинского. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 100 с.
 6. Марков Б.А., Бондаренко В.В., Высоккин А.В. Упрочнение плазменно-порошковой наплавкой почворежущего инструмента // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию Липецкого государственного технического университета. 2016. С. 208–213.
 7. Высоккин А.В., Марков Б.А. Исследование свойств металла после плазменно-порошковой наплавки // Тенденции развития современной науки: сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2 частях. 2017. С. 20–21.
 8. Конкурентные преимущества. ООО НПП «ВАЛОК». URL: <http://www.valok.ru/ru/produktsiya/uproch-pochvoobrabatinstrument/konkuretnye-preimushchestva> (дата обращения: 07.12.2019).
- ### References
1. Zharskiy I.M. Materialovedeniye: uchebnoye posobiye [Materials Science: Study Guide]. Minsk: Vysh-eyshaya shkola Publ., 2015. 557 p.
 2. Plugi PBS (PBS-4, PBS-5, PBS-8) | Uslugi i produktsiya. AO «RATSIO» [Elektronnyy resurs] URL: <http://ratio34.ru/services-and-products/plow-mounted-universal-pbs-4-pbs-5-pbs-8/> (accessed: 07.12.2019).
 3. Adaskin A.M., Sedov YU.E., Onegina A.K., Klimov V.N. Materialovedeniye v mashinostroyenii: uchebnyk dlya bakalavrov [Materials science in mechanical engineering: a textbook for bachelors]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt Publ., 2015. 535 p.
 4. Plugi serii PBS [Elektronnyy resurs] URL: <https://agri-tech.ru/info/cat1/page29.html> (accessed: 07.12.2019).
 5. Materialovedeniye [Materials Science]: uchebnoye posobiye. Pod red. A.G. Baginskogo. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2013. 100 p.
 6. Markov B.A., Bondarenko V.V., Vysochkin A.V. Hardening of soil-cutting tools by plasma-powder surfacing. Problemy i perspektivy razvitiya mashinostroyeniya: Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Problems and prospects for the development of mechanical engineering: Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the Lipetsk State Technical University]. 2016, pp. 208–213 (In Russ.).
 7. Vysochkin A.V., Markov B.A. Investigation of metal properties after plasma-powder surfacing. Tendentsii razvitiya sovremennoy nauki: sbornik tezisov dokladov nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Trends in the development of modern science: a collection of abstracts of the scientific conference of students and postgraduates of the Lipetsk State Technical University]: v 2 chastyakh. 2017, pp. 20–21 (In Russ.).
 8. Konkurentnyye preimushchestva. ООО НПП «ВАЛОК» [Elektronnyy resurs] URL <http://www.valok.ru/ru/produktsiya/uproch-pochvoobrabatinstrument/konkuretnye-preimushchestva> (accessed: 07.12.2019).