УДК 621.785.5

DOI: 10.35809/2618-8279-2019-4-12

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЧИЗЕЛЬНЫХ ОРУДИЙ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

INCREASE OF WEAR RESISTANCE OF WORKING BODIES OF CHISEL TOOLS DUE TO RATIONAL STRUCTURING OF METALLOGRAPHIC STRUCTURE OF HIGH-CARBON ALLOYS

Д.Б. Курбанов¹,
Д.С. Гапич¹, доктор технических наук, доцент,
В.А. Моторин^{1,2}, кандидат технических наук, доцент

D.B. Kurbanov¹,
D.S. Gapich¹, doctor of technical sciences, associate professor,
V. A. Motorin^{1,2}, candidate of technical sciences, associate professor

¹Волгоградский государственный аграрный университет,
²Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия

¹Volgograd State Agrarian University,
²All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture

Статья посвящена разработке и внедрению технологических принципов изготовления рабочих органов чизельных орудий литьем из серого чугуна с частичным отбелом рабочих кромок поверхностей, взаимодействующих с почвенным пластом. В результате испытаний установлено, что наибольшей износостойкостью обладает серый и высокопрочный чугуны с отбеленной рабочей поверхностью. Высокая износостойкость рабочего органа достигается отбелом его рабочей части с помощью холодильника, вставленного в форму, или за счет отсутствия облицовки в соответствующей зоне кокиля. Сильное переохлаждение жидкого чугуна в контакте с холодильником или с металлической поверхностью кокиля вызывает кристаллизацию метастабильной эвтектики, и она в отбеленной части отливки приобретает структуру ледобурита с твердостью не ниже 64 HRC. При этом основной объем чугуна кристаллизуется в стабильной системе с образованием аустенитно-графитной эвтектики и после полного охлаждения должен иметь перлитную металлическую основу, обеспечивающую хорошую обрабатываемость отливки резанием. Рабочие поверхности и режущие кромки долот подвергаются абразивному и химическому воздействию почвы, провоцирующему интенсивный износ, который является основной причиной выхода их из строя. При проведении полевых экспериментов износ долот из серого чугуна с пластинчатым графитом и отбелом режущей части сопровождается обламыванием режущей кромки. У высокопрочного чугуна с шаровидным графитом происходит постепенное равномерное истирание с эффектом самозаточки. Доказано, что использование приведенной технологии позволяет увеличить ресурс рабочих органов и повысить технологичность изготовления по критериям трудоемкости и формообразования.

The article is devoted to the development and implementation of technological principles for manufacturing working bodies of chisel tools by casting from gray cast iron with partial bleaching of working edges and surfaces interacting with the soil layer. As a result of tests, it was found that gray and high-strength cast iron with a bleached working surface has the highest wear resistance. High wear resistance of the working body is achieved by bleaching its working part with the help of a refrigerator inserted into the mold, or due to the lack of lining in the corresponding area of the Coquille. Strong supercooling of liquid cast iron in contact with the refrigerator or with the metal surface of the Coquille causes metastable eutectic to crystallize, and it acquires the structure of ledeburite in the bleached part of the casting, with a hardness of at least 64 HRC. In this case, the main volume of cast iron crystallizes in a stable system with the formation of austenitic-graphite eutectic and after complete cooling must have a perlite metal base that provides good machining of the casting by cutting. The working surfaces and cutting edges of the bits are exposed to the abrasive and chemical effects of the soil, provoking intense wear, which is the main reason for their failure. When conducting field experiments, wear of gray cast iron bits with plate graphite and cutting part bleaching is accompanied by breaking of the cutting edge. In high-strength cast iron with spherical graphite, there is a gradual uniform abrasion with the effect of self-sharpening. It is proved that the use of this technology can increase the resource of working bodies and increase the manufacturability of manufacturing according to the criteria of labor intensity and shaping.

Ключевые слова: долото чизельного плуга, износостойкость, серый чугун, отбел рабочей поверхности, углеродистые стали, цементитная и графитовая эвтектики

Key words: chisel plow chisel, wear resistance, gray cast iron, whitewash work surface, carbon steel, cementite and graphite eutectic

Введение. Высокие нормы расхода долот, трудозатраты на частую замену их в полевых условиях, увеличение расхода горючего вследствие возрастания тягового сопротивления при затуплении режущей кромки долота [1, 16] значительно увеличивают себестоимость обработки закрытых почвогрунтов и обостряют актуальность повышения надежности этих рабочих органов.

В силу прогрессивного увеличения значений удельного сопротивления почвы в нижних слоях чизельной обработки резко возрастает тяговое сопротивление движению долота [8, 2, 6, 7, 9, 11, 15, 3]. Сварка плавлением, применяемая при изготовлении долот с боковым креплением, требует снижения содержания углерода в используемых сталях ниже 0,3-0,4%. Для повышения износостойкости долот из малоуглеродистой стали применяют наплавки сплавами типа «сормайт». Однако наплавленный слой склонен к растрескиванию и отслаиванию.

В последнее время появились рекомендации по выполнению изнашиваемых поверхностей тяжело нагруженных деталей почвообрабатывающих орудий из стали Hardox фирмы SSAB Oxelosund, которая отличается хорошей свариваемостью, износостойкостью и успешно применяется в карьерной и горнодобывающей технике. Однако состоятельность этих рекомендаций не подтвердили результаты полевых испытаний [10, 12, 4, 13, 5, 14].

Целью научно-исследовательской работы являлось повышение износостойкости рабочих органов, испытывающих в основном абразивный характер изнашивания, за счет применения серого чугуна.

Работу выполняли в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-2870.2019.8.

Материалы и методы. Исследования проводили на термически обработанных образцах (отливках) из чугуна СЧ20, сталей 65Г, 45 и Hardox 450, широко применяемых для изготовления долот почвообрабатывающих машин. Параметры режимов термической обработки приведены в таблице 1.

Методика исследований предусматривала проведение сравнительных лабораторных испытаний исследуемых чугуна и стали, термообработанных по разным режимам, на абразивную износостойкость. В качестве эталона использовали сталь 45.

Неподвижный образец с усилием 39,2 Н прижимали к поверхности с закрепленным на ней карборундовым абразивом с величиной зерна 100-125 мкм. Абразивная поверхность двигалась относительно образца со скоростью 1,0 м/с.

Оценку износостойкости образцов проводили по относительной износостойкости ϵ , равной отношению потери массы испытуемого образца Δm к потере

Таблица 1 – Параметры режимов термической обработки

Номер и материал образца	Параметры режима термообработки
№1. Чугун СЧ20	По режиму №2 + закалка токами высокой частоты (ТВЧ) с оплавлением рабочей поверхности
№2. Сталь 65Г	Закалка от $t=820^{\circ}\text{C}$, далее охлаждение в масле и отпуск при $t=350^{\circ}\text{C}$
№3. Сталь 45	Нормализация при $t=880^{\circ}\text{C}$ в течение $\tau=2$ час., далее охлаждение на воздухе
№4. Сталь Hardox 450	Термическая обработка от производителя

массы эталонного образца $\Delta m_{\text{эт}}$ в одинаковых условиях износа соответственно.

Долота, изготовленные из стали и чугуна и термообработанные по экспериментальным режимам, подвергали эксплуатационным испытаниям в полевых условиях в осенний период глубокой обработки на каштановых почвах средней зернистости в состоянии их физической спелости.

Экспериментальные долота устанавливали на одном агрегате. По мере выхода из строя их заменяли на серийные.

Общая площадь вспашки – 400 га.

Результаты и обсуждение. Упрочнение образца №1 из чугуна СЧ20 и созданием на его поверхности отбеленного слоя, состоящего из цементитной эвтектики – ледебурита, осуществляли локальным быстрым нагревом до расплавления металла при закалке ТВЧ. При тепловом воздействии основная масса металла оставалась холодной. Поэтому после отключения источника тепла тонкий расплавленный поверхностный слой вследствие интенсивного теплоотвода на большую холодную массу затвердевал с сильным переохлаждением относительно эвтектического солидуса с образованием ледебурита. Микротвердость отбеленного ледебуритного слоя, сформированного на чугуне СЧ20, была равна $H_{50}=10\ 210\pm1\ 403$ МПа. Основным отличием была толщина отбеленного слоя. В процессе нагрева ТВЧ отбеленный слой составлял 1,2 мм и более.

Образец №2 из стали 65Г после закалки и отпуска имел микроструктуру отпущенного среднеуглеистого мартенсита (балл 5 по ГОСТ 8233-56), твердость составляла $HRC\ 47\pm1,8$, а ударная вязкость $KCU - 31$ Дж/см².

Микроструктура образца №3 из стали 45, получившая наиболее широкое распространение при изготовлении долот чизельных плугов, представляла собой относительно однородную смесь зерен феррита и перлита, характерную для

нормализованного состояния, твердость стали $HV\ 185\pm2,1$.

Образец №4 из стали Hardox 450 при изготовлении долота термической обработке не подвергали, поскольку эта сталь поставляется в термически обработанном состоянии, а режимы термической обработки фирма-производитель не раскрывает. Микроструктура стали Hardox 450 представляла собой тростно-сорбит высокой дисперсности, твердость стали $HV\ 411\pm4,7$.

Динамика потери массы образцами экспериментальных материалов при испытаниях на абразивный износ представлена на рисунке 1.

Результаты испытаний показали, что наибольшей и близкой по величине износостойкостью, кратно превышающей износостойкость остальных исследуемых материалов, обладали серый и высокопрочный чугуны с отбеленной рабочей поверхностью. Так, для чугуна СЧ20 после закалки ТВЧ $\epsilon=4,13$. Сталь Hardox 450 ($\epsilon=1,98$) показала сопротивление износу, соизмеримое с результатами стали 65Г ($\epsilon=2,05$), термообработанной на близкую по величине твердость.

Эксплуатационные испытания на протяжении всего сезона осенней глубокой обработки почвы выявили некоторые особенности износостойкости опытных долот. Они показали, что наработка долота из стали Hardox 450 до максимального допустимого износа рабочей кромки не превысила 4 га. Ресурс долот из закаленной стали 65Г составил 18-20 га. Максимальную стойкость проявили долота из серого чугуна СЧ20, отбеленные путем оплавления при нагреве электрической дугой. Они простояли весь сезон, не исчерпав своего ресурса при наработке 100 га. Кардинальное повышение ресурса долот с отбеленным слоем связано не только с высокой износостойкостью собственно ледебуритного слоя, но также и с реализацией в процессе эксплуатации эффекта самозатачивания режущей

Рисунок 1 – Микроструктуры образцов № 2-4 ($\times 100$):
 а – сталь 65Г в состоянии закалки и отпуска, б – сталь 45 после нормализации,
 в – сталь Hardox 450 в состоянии поставки

кромки вследствие значительной разницы боковых поверхностей клина по износостойкости.

В ходе проведения исследований было установлено, что при работе в полевых условиях износ долот из серого чугуна с пластинчатым графитом и отбелом режущей части сопровождался обламы-

ванием режущей кромки и происходил гораздо интенсивнее, чем у высокопрочного чугуна с шаровидным графитом,

для которого было свойственно постепенное истирание.

Заключение. Применение серого чугуна СЧ20 для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих орудий оправдано в условиях работы с преимущественно абразивным характером воздействия внешней среды.

Библиографический список

1. Гапич, Д.С. Результаты испытаний чизельных рабочих органов из высокоуглеродистых сплавов / Д.С. Гапич, В.А. Моторин, Е.В. Ширяева, Г.А. Любимова, Д.Б. Курбанов // Сельский механизатор. – 2019. – №7. – С. 36-37.
2. Грибенченко, А.В. Улучшение качества сварного соединения за счет переноса углерода из околошовной зоны / А.В. Грибенченко, В.А. Моторин, Г.А. Любимова, Д.П. Скворцов // Научная жизнь. – 2017. – №12. – С. 6-12.
3. Костылева, Л.В. Комплексное влияние химического состава чугуна на структуру отбеленного слоя долота чизельного плуга / Л.В. Костылева, Д.С. Гапич, В.А. Моторин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – №2. – С. 221-228.
4. Костылева, Л.В. Микроструктура и абразивная износостойкость тяжело нагруженных деталей чизельных плугов из высокопрочного чугуна / Л.В. Костылева, Д.С. Гапич, В.А. Моторин, А.Е. Новиков // Черные металлы. – 2019. – №3 (1047). – С. 37-42.
5. Костылева, Л.В. Изменение состава и свойств цементита при термической обработке рабочих органов почвообрабатывающих машин из отбеленного чугуна / Л.В. Костылева, Д.С. Гапич, А.Е. Новиков, В.А. Моторин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – №4. – С. 3-9.

Bibliographic list

1. Gapich, D.S. Results of tests of chisel working bodies from high-carbon alloys / D.S. Gapich, V.A. Motorin, E.V. Shiryayeva, G.A. Lyubimova, D.B. Kurbanov // Rural mechanizer. – 2019. – No.7. – P. 36-37.
2. Gribenchenko, A.V. Improving the quality of welded joints due to the transfer of carbon from the near-wash zone / A.V. Gribenchenko, V.A. Motorin, G.A. Lyubimova, D.P. Skvortsov // Scientific life. – 2017. – No.12. – C. 6-12.
3. Kostyleva, L.V. Complex influence of chemical composition of cast iron on the structure of the chilled layer chisels chisel plow / L.V. Kostyleva, D.S. Gapich, V.A. Motorin // proceedings of lower Volga agrodiversity complex: Science and higher professional education. – 2016. – No.2. – P. 221-228.
4. Kostyleva, L.V. Microstructure and abrasive wear resistance of heavily loaded parts of chisel plows made of high-strength cast iron / L.V. Kostyleva, D.S. Gapich, V.A. Motorin, A.E. Novikov // Ferrous metals. – 2019. – No.3 (1047). – P. 37-42.
5. Kostyleva, L.V. Change in the composition and properties of cementite during heat treatment of working bodies of soil-processing machines from bleached cast iron / L.V. Kostyleva, D.S. Gapich, A.E. Novikov, V.A. Motorin // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2019. – №4. – P. 3-9.

6. Костылева, Л.В. Улучшение структуры и свойств литых деталей из среднеуглеродистой стали термоциклической обработкой / Л.В. Костылева, А.Е. Новиков, Д.С. Гапич, В.А. Моторин, Е.Ю. Карпова // *Материаловедение*. – 2019. – №4. – С. 23-28.

7. Макаренко, К.В. О получении из литого состояния полувинчатых чугунов с аусферритной структурой / К.В. Макаренко // *Литейное производство*. – 2010. – №2. – С. 2-6.

8. Моторин, В.А. Формирование износостойких зонально-распределенных структур деталей орудий для почвообработки из высокопрочного чугуна / В.А. Моторин, Д.С. Гапич, Л.В. Костылева, А.Е. Новиков // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2018. – №4. – С. 269-276.

9. Моторин, В.А. Структурирование рабочих органов из высокопрочного чугуна / В.А. Моторин, Д.Б. Курбанов // *21 век: фундаментальная наука и технологии: матер. XVII международной научно-практической конф., North Charleston, USA, 1-2 октября 2018 г. / ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ [и др.]*. – North Charleston, 2018. – Том 2. – С. 98-100.

10. Моторин, В.А. Повышение надежности рабочих органов почвообрабатывающих орудий, выполненных из чугуна / В.А. Моторин, Л.В. Костылева, Д.С. Гапич // *Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий: матер. международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы, Волгоград, 31 января-2 февраля 2018 г. / ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ [и др.]*. – Волгоград, 2018. – Том 2. – С. 252-257.

11. Novikov, A.E. Composition and Tribological Properties of Hardened Cutting Blades of Tillage Machines under Abrasive Deterioration / A.E. Novikov, V.A. Motorin, M.I. Lamskova, M.I. Filimonov // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39, No.2. – P. 158-163.

12. Panneerselvam, S., Martis, C.J., Putatunda, S.K., Boileau, J.M., 2015. An investigation on the stability of austenite in Austempered Ductile Cast Iron (ADI) (Article) *Materials Science and Engineering A* Volume 626, February 05, 2015. – P. 237-246.

13. Yu, D. Non-single bionic coupling model for thermal fatigue and wear resistance of gray cast iron drum brake. / Yu D., Zhou T., Zhou H., Bo H., Lu H. // *Optics and Laser Technology*. Volume 111, April 2019. – P. 781-788.

14. Bertolino, G. Geometrical effects on lamellar grey cast iron fracture toughness / Bertolino G., Perez-Ipiña J.E. // (2006) *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (1-3). – P. 202-206.

15. Surface alloying of gray cast iron with chromium by high current pulsed electron beam treatment / Li C., Guan Q., Cai J., Lv P., Jin Y. // *Materials Research Express*. Volume 5, Issue 6, June 2018, No. 066518.

16. Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C.M., Heim, R., 2015. Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications, Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability LBF, Darmstadt, Germany (Conference Paper). International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, VAL 2015; Prague Congress Centre5. Kvetna 65Prague 4; Czech Republic; 23 March 2015 through 26 March 2015, Volume 101, Issue C, 2015. – P. 440-449.

6. Kostyleva, L.V. Improvement of structure and properties of cast parts from medium-carbon steel by thermocyclic treatment / L.V. Kostyleva, A.E. Novikov, D.S. Gapich, V.A. Motorin, E.Yu. Karpova // *materials Science*. – 2019. – No.4. – P. 23-28.

7. Makarenko, K.V. on obtaining half-cast iron with ferrite structure from the cast state / K.V. Makarenko // *Foundry production*. – 2010. – No.2. – P. 2-6.

8. Motorin, V.A. Formation of wear-resistant zonal-distributed structures of details of tools for soil treatment from high-strength cast iron / V.A. Motorin, D.S. Gapich, L.V. Kostyleva, A.E. Novikov // *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka I vyshe vocational education*. – 2018. – No.4. – С. 269-276.

9. Motorin, V.A. Structuring working bodies of high-strength cast iron / V.A. Motorin, D.B. Kurbanov // *21st century: fundamental science and technology: proceedings of the XVII international scientific and practical conference, North Charleston, USA, 1-2 October 2018 / Volgograd State Agrarian University [et al.]*. – North Charleston, 2018. – Volume 2. – P. 98-100.

10. Motorin, V.A. Improving the reliability of working bodies of tillage tools made of cast iron / V.A. Motorin, L.V. Kostyleva, D.S. Gapich // *World scientific and technological trends in the socio-economic development of agriculture and rural areas: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the end of the battle of Stalingrad, Volgograd, January 31-February 2, 2018 / Volgograd State Agrarian University [et al.]*. -Volgograd, 2018. – Volume 2. – P. 252-257.

11. Novikov, A.E. Composition and Tribological Properties of Hardened Cutting Blades of Tillage Machines under Abrasive Deterioration / A.E. Novikov, V.A. Motorin, M.I. Lamskova, M.I. Filimonov // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39, No.2. – P. 158-163.

12. Panneerselvam, S., Martis, C.J., Putatunda, S.K., Boileau, J.M., 2015. An investigation on the stability of austenite in Austempered Ductile Cast Iron (ADI) (Article) *Materials Science and Engineering A* Volume 626, February 05, 2015. – P. 237-246.

13. Yu, D. Non-single bionic coupling model for thermal fatigue and wear resistance of gray cast iron drum brake. / Yu D., Zhou T., Zhou H., Bo H., Lu H. // *Optics and Laser Technology*. Volume 111, April 2019. – P. 781-788.

14. Bertolino, G. Geometrical effects on lamellar grey cast iron fracture toughness / Bertolino G., Perez-Ipiña J.E. // (2006) *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (1-3). – P. 202-206.

15. Surface alloying of gray cast iron with chromium by high current pulsed electron beam treatment / Li C., Guan Q., Cai J., Lv P., Jin Y. // *Materials Research Express*. Volume 5, Issue 6, June 2018, No. 066518.

16. Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C.M., Heim, R., 2015. Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications, Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability LBF, Darmstadt, Germany (Conference Paper). International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, VAL 2015; Prague Congress Centre5. Kvetna 65Prague 4; Czech Republic; 23 March 2015 through 26 March 2015, Volume 101, Issue C, 2015. – P. 440-449.

Дополнительные сведения об авторах:

Дмитрий Байрамович Курбанов, аспирант¹,

Дмитрий Сергеевич Гапич, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса машин в АПК¹,

Вадим Андреевич Моторин, доцент кафедры эксплуатации и технического сервиса машин в АПК¹, старший научный сотрудник отдела оросительных мелиораций², vmotorin001@yandex.ru

Additional information about the authors:

Dmitry Bayramovich Kurbanov, post-graduate student of the department operation and technical service of machines in agriculture¹,

Dmitry Sergeevich Gapich, head of the department operation and technical service of machines in agriculture¹,

Vadim Andreevich Motorin, associate professor of the department operation and technical service of machines in agriculture¹, senior researcher of the irrigation land reclamation department², vmotorin001@yandex.ru