

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.316.022

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78



Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде

Михаил Никитьевич Ерохин, академик РАН, д-р техн. наук, профессор

n.erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Сергей Михайлович Гайдар, д-р техн. наук, профессор

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Дмитрий Михайлович Скороходов[✉], канд. техн. наук, доцент

d.skorokhodov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID: AFH-8012-2022

Софья Михайловна Ветрова, аспирант

Алина Сергеевна Барчукова, аспирант

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Импортозамещение рабочих органов сельскохозяйственных машин возможно при разработке высококачественной стали и технологий ее упрочнения, соответствующих условиям работы сельскохозяйственной техники. Сталь в сочетании с высокой износостойкостью в абразивной среде должна обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью. С целью исследования износостойкости разработанных низколегированных сталей в абразивной среде и оценки возможности их применения для изготовления высокоресурсных рабочих органов сельскохозяйственной техники разработаны 4 партии образцов стали с добавками. Для всех образцов проводилась термическая обработка с нагревом до температуры 900°C и закалкой в воду при температуре 20°C. Вторая группа образцов дополнительно подвергалась отпуску при температуре 280°C в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. На испытательной установке определялась износостойкость образцов согласно ГОСТ 23.208-79. Установлено, что наименьшая интенсивность износа 0,0581 г/м достигнута для стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti с термической обработкой «Закалка». Высокий предел прочности 2170 МПа достигается за счет образования карбонитридов, обогащенных Nb. Износостойкость данной стали в сравнении со сталью 65Г выше в 1,66 раза. При термической обработке «Закалка и отпуск» относительная износостойкость данной стали на 10,7% ниже, что объясняется фазовыми превращениями, уменьшающими предел прочности до 2040 МПа, но повышающими пластичность стали. Проведенные исследования показали широкий диапазон изменения износостойкости в зависимости от термической обработки. Это дает возможность в сравнительно небольших интервалах изменения температур закалки и отпуска воздействовать на структуру стали, тем самым воздействовать на свойства, которые обеспечивают наибольшую износостойкость.

Ключевые слова: износостойкость, сталь, термическая обработка, рабочие органы, сельскохозяйственная техника

Благодарности. Исследования проведены в ходе выполнения гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-572 от 31 мая 2021 г. «Перспективные стали для сельскохозяйственной техники»

Формат цитирования: Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 72-78. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>.

© Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment

Mikhail N. Erokhin, Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor

n.erohin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Sergey M. Gaidar, DSc (Eng), Professor

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

Dmitry M. Skorokhodov✉, CSc (Eng), Associate Professor

d.skorokhodov@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

Sofya M. Vetrova, postgraduate students

Alina S. Barchukova, postgraduate students

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

Abstract. The import substitution of agricultural machinery implements is possible with the development of high quality steel and hardening technologies appropriate to the operating conditions of agricultural machinery. Along with high wear resistance in abrasive environment, steel must have high ductility and impact toughness. To investigate wear resistance of the developed low-alloy steels in the abrasive environment and estimate the possibility of their application for manufacturing high-resistance working tools of agricultural machinery the authors developed four batches of steel samples with additives. All samples were subject to heat treatment with heating to 900°C and quenching in water at 20°C. The second group of samples was additionally tempered at a temperature of 280°C for an hour, followed by air cooling. The wear resistance of samples was determined according to GOST 23.208-79 with the test equipment. The least wear intensity of 0.0581 g/m was recorded for steel 0.43C-1.60Si-0.01Mn-1.1Cr-0.95Mo-0.08V-0.05Nb-0.04Ti subjected to heat treatment with quenching. The high tensile strength of 2170 MPa was obtained through the formation of carbonitrides enriched with Nb. The wear resistance of this steel grade is 1.66 times higher than that of the 65G steel grade. The heat treatment of quenching with tempering yielded the relative wear resistance of the given steel by 10.7% lower, which can be explained by phase transformations reducing the ultimate strength to 2040 MPa, but increasing the plasticity of steel. Studies have shown a wide range of changes in wear resistance depending on the heat treatment mode. This makes it possible to modify the structure of steel in relatively small temperature intervals of quenching and tempering, thereby influencing the properties that provide the greatest wear resistance.

Keywords: wear resistance, wear intensity, heat treatment, working tools, agricultural machines

Acknowledgements. The research was funded by the grant of the Ministry of Education and Science of Russian Federation No. 075-15-2021-572 of May 31, 2021 “Promising Steels for Agricultural Machinery”.

For citation: Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M., Vetrova S.M., Barchukova A.S. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):72-78. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>.

Введение. Отечественная сельскохозяйственная техника по многим показателям качества уступает машинам ведущих зарубежных фирм. Затраты на ремонт, запчасти и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии, в структуре себестоимости сельскохозяйственной продукции составляют более 12% [1]. Ежегодно ремонту подвергается более 70% почвообрабатывающих машин. На устранение отказов и поддержание машин в работоспособном состоянии приходится до 60% общих затрат. Около 80% отказов происходит из-за износа деталей [2]. Особенно интенсивно изнашиваются детали рабочих органов сельскохозяйственных машин. Так, средняя наработка на отказ отечественных лемехов, лап культиваторов, дисков луцильников и дисковых борон в зависимости от типа почвы находится в пределах 8...20 га. Испытания показывают, что кроме изнашивания при высоких скоростях и значительных динамических нагрузках, до 16% лемехов заменяются по причине их деформации и излома [3].

За последние годы в структуре машинно-тракторного парка существенно увеличилось количество импортной техники. Например, оборудование

животноводческих ферм и комплексов почти на 95% является импортным. В растениеводстве широко используются плуги фирм A. Lemken (Германия), Kverneland (Норвегия), Vodel-Noot (Австрия) и др. Практически на всех машинах, производимых российскими фирмами, устанавливаются импортные рабочие органы. Зарубежная техника является более надежной, ее рабочие органы изготавливаются из износостойких и прочных материалов, обеспечивающих двукратное превышение их ресурса по сравнению с отечественными рабочими органами. Кроме того, практически все машины оснащены различными датчиками и устройствами, предохраняющими рабочие органы от поломок и деформаций при перегрузках. Все рабочие органы кормоприготовительного оборудования, почвообрабатывающей техники, представленные на выставках «Золотая осень-2022» и «Agros expro-2023», – зарубежного производства (Турция, Германия, Франция и др.).

Уход с российского рынка по причине санкций большинства зарубежных фирм, прекращение поставок запасных частей для эксплуатируемой в России зарубежной техники в случае отсутствия срочных мер

может нанести существенный ущерб сельскохозяйственным производителям России. Особенно остро стоит вопрос о необходимости замены дорогостоящих импортных рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью. Для организации импортозамещения рабочих органов сельскохозяйственных машин необходимо в первую очередь разработать и организовать выпуск высококачественных сталей и технологий их упрочнения, соответствующих условиям работы сельскохозяйственной техники.

Цель исследований: в лабораторных условиях исследовать износостойкость разработанных низколегированных сталей в абразивной среде и оценить возможность их применения для изготовления высоконагруженных рабочих органов сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы. Для изготовления лемехов, лап культиваторов и других рабочих органов почвообрабатывающих машин используется в основном сталь 65Г с поверхностной твердостью HRC 55...60, что соответствует 8...8,5 тыс. МПа.

В таблице 1 приведены механические свойства сталей 40, 45, 65Г, Х12, 40Х, 30ХГСА, 18ХГТ, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении¹.

Стали в сочетании с высокой износостойкостью в абразивной среде должны обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью.

Для сравнительной оценки износостойкости разрабатываемых низколегированных сталей изготовлены 4 партии образцов с добавками:

Партия 1: 0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti.

Партия 2: 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti.

Партия 3: 0,44С-1,81Si-1,33Mn-0,82Cr-0,28Mo.

Партия 4: 0,41С-0,58Si-1,36Mn-1,30Cr-0,63Mo-0,12V-0,05Nb-0,04Ti.

Все образцы подвергались термической обработке с нагревом до температуры 900°С и закалкой в воду при температуре 20°С. Вторая группа образцов дополнительно подвергалась отпуску при температуре 280°С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе [4-8].

Изнашивание образцов в соответствии с ГОСТ 23.208-79 проводили на установке (рис. 1), соответствующей схеме изнашивания образцов со свободными абразивными частицами. Образцы для испытаний на износостойкость представляли собой плоские пластины размером 50x25 мм и толщиной 8 мм. Испытуемый образец 1 устанавливали в образцедержатель 2 и прижимали рычагом к ролику с усилием 44.1±0,25 Н. Абразивные частицы из дозирующего устройства 5, попадая на образец, внедрялись в резиновый вращающийся ролик 6 и, протаскиваясь через зону контакта, изнашивали испытываемый материал.

Таблица 1

Механические свойства сталей, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении

Table 1

Mechanical properties of steels used in agricultural engineering

Марка стали Grade of steel	Термообработка Heat treatment	Предел прочности, σ_B , МПа Tensile strength, σ_B , MPa	Твердость поверхности Surface hardness	
			HRC	HB
Сталь 45 / Steel 45	Закалка 850°С в воде, отпуск 450°С Hardening 850°C in water, tempering 450°C	980	50	200
65Г / 65G	Закалка 830°С в масле, отпуск 200°С Hardening 830°C in oil, tempering 200°C	1670	61	-
30ХГСА / 30HGSA	Закалка 880°С в масле, отпуск 540°С, вода Hardening 880°C in oil, tempering 540°C, water	1080	-	225
20ХГР / 20HGR	Закалка 880°С в масле, отпуск 200°С в масле Hardening 880°C in oil, tempering 200°C in oil	1490	45	-
Сталь 40 / Steel 40	Закалка 850°С в масле, отпуск 200°С в масле Hardening 850°C in oil, tempering 200°C in oil	930	-	267
X12	Закалка 970°С в масле, отпуск 180°С Hardening 970°C in oil, tempering 180°C	-	62	-
40Х	Закалка 860°С в масле, отпуск 200°С, вода Hardening 860°C in oil, tempering 200°C, water	1760	-	552

¹ Марочник сталей и сплавов / Сост. Ю.Г. Драгунов и др.; Под ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1215 с.

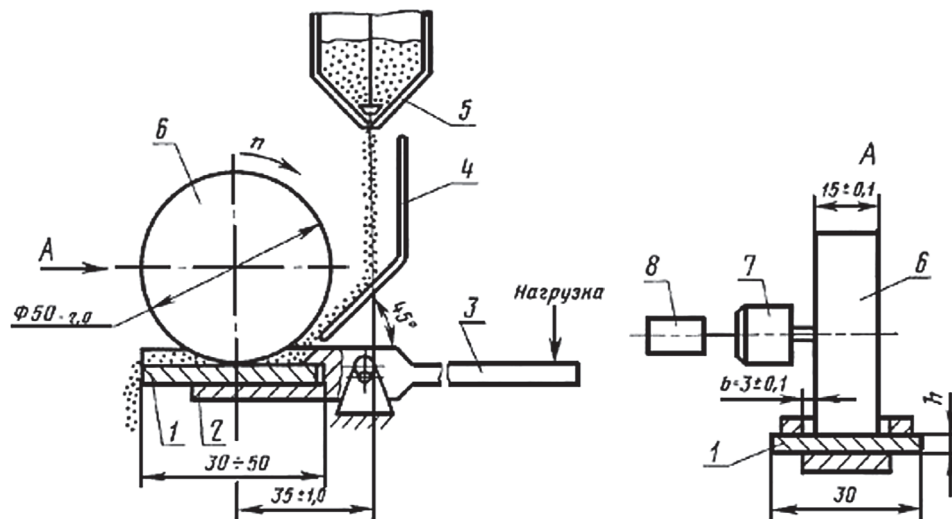


Рис. 1. Схема испытательной установки на абразивный износ:

- 1 – испытуемый образец; 2 – образцедержатель; 3 – рычаг; 4 – направляющий лоток; 5 – устройство дозирования абразивного материала; 6 – резиновый ролик; 7 – привод; 8 – устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытания

Fig.1. Scheme of the abrasive wear testing installation:

- 1 – test sample; 2 – sample holder; 3 – lever; 4 – guide tray; 5 – abrasive material dosing device; 6 – rubber roller; 7 – drive; 8 – device for controlling the total number of the roller’s turnovers during the test

Дозирующее устройство обеспечивало непрерывное поступление абразивного материала в зону контакта.

Испытание образца из исследуемого материала продолжали в течение времени, обеспечивающего рекомендуемое количество оборотов ролика (табл. 2).

Перед проведением испытаний замеряли твердость образцов по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999-74.

Образцы промывали и взвешивали до испытаний и после них на аналитических весах «ГОСМЕТР ВЛ-224» с точностью до 0,001 г.

Испытания образцов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы проводились согласно ГОСТ 23.208-79.

В соответствии ГОСТ 28818-90 в качестве абразивного материала использовали электрокорунд белый 25А (шлифзерно) – 0,212...0,425 (F60), шлифзерно из синтетического корунда с наивысшим содержанием оксида алюминия (Al₂O₃) до 99%, определяющим показатель твердости 9 по шкале Мооса.

За эталонный материал принят образец из стали 45 в состоянии поставки твердостью НВ = 200, относительная износостойкость которого принята как $\epsilon_{ст} = 1$.

Результаты и их обсуждение. Изнашивание образцов из исследуемых материалов в лабораторных условиях моделирует процесс изнашивания рабочих органов, работающих в почве.

Работа сельскохозяйственной техники происходит в условиях высокой запыленности окружающей среды, неустановившегося режима нагружения, повышенной влажности, кислотности, щелочности,

абразивности обрабатываемой среды, ускоряющих износ деталей и сокращающих срок службы сельскохозяйственных машин.

В 1 м³ пылевидного облака содержится от 0,04 до 5 г пыли, которая на 60...80% состоит из взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды алюминия и другие элементы). Анализ состава пыли, взятой в разных регионах Московской области, показывает содержание кварца в ней почти 80%, оксида алюминия – 11% [2].

В структуре обрабатываемых почв содержится от 36 до 70% минеральных частиц кварца и гранита [3]. Микротвердость кварцевых частиц колеблется в пределах 10,5...11,3 тыс. МПа, оксида алюминия – 21 тыс. МПа. Поверхностная микротвердость большинства деталей сельскохозяйственных машин составляет 7...8 тыс. МПа, что примерно в 1,5 раза меньше микротвердости кварцевых частиц и более чем в 2,5 раза меньше твердости частиц оксида алюминия.

Таблица 2
Рекомендуемое количество оборотов ролика в зависимости от твердости образцов

Table 2
Recommended number of the roller’s turnovers depending on the sample hardness

Твердость образцов, НВ <i>Sample hardness, HV</i>	Количество оборотов ролика, мин ⁻¹ <i>Number of the roller’s turnovers, min⁻¹</i>
До 400 / Up to 400	600
400...800	1800
Более 800 / Over 800	3600

Проблеме абразивного изнашивания посвящены работы ряда ученых: М.М. Хрущева, М.М. Тененбаума, Н.В. Крагельского, Б.М. Костецкого и др. Оценить способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой деталей и разрушать его при движении можно по формуле:

$$K_r = \frac{H_m}{H_a},$$

где H_m – микротвердость испытуемого материала; H_a – микротвердость абразива.

Считается критическим значение $K_r = 0,5 \dots 0,7$. Прямое разрушение поверхностного слоя материала абразивной частицы с сохранением ее целостности происходит при $K_r < 0,5$. Прямое разрушение маловероятно при $K_r > 0,7$.

По данным исследований М.М. Хрущева, для минимизации абразивного износа поверхностная твердость материала должна быть не ниже 17,5 тыс. МПа, то есть примерно в 1,5 раза выше микротвердости кварца. При изготовлении лемехов из стали 65Г с термообработкой обеспечивается $K_r = 0,75$, что объясняет интенсивный их износ при эксплуатации.

За рубежом для изготовления рабочих органов сельскохозяйственной техники используют стали Creusabro 4800, N22CB, Hardox 500, Hardox 600, Domex 22MnB5 и другие, которые относятся к классам прочности 1200...1600 МПа и имеют высокую ударную вязкость [9]. Например, стали марки Domex, применяемые для изготовления лемехов, ножей и других деталей, работающих в абразивной среде, содержат от 0,20 до 0,42% С, до 0,40% Si, от 1,1 до 1,5% Mn, от 0,1 до 0,6 Cr, а также В в концентрации от 0,0008 до 0,005. Такое соотношение элементов обеспечивает значение временного сопротивления после закалки в воду $\sigma_B = 1580 \dots 2050$ МПа и твердость 460...637 HV.

Стали марки Hardox 500-600, производимые компанией SSAB, также имеют высокую твердость, износостойкость, ударную вязкость. Такое сочетание достигается за счет дополнительного легирования (Mo и Ni – для повышения вязкости; Cr и добавка В – для повышения прокаливаемости и уменьшения размера структурных элементов мартенсита), повышения чистоты стали путем снижения $P \leq 0,015\%$. При этом стоимость отмеченных зарубежных сталей в 1,5...2 раза выше отечественных. Ресурс деталей, например, из стали Hardox, в 5 раз выше, чем у аналогичных деталей из отечественных сталей.

В углеродистых сталях при повышении температур выше определенного уровня происходит ряд фазовых превращений, вызывающих изменения

кристаллической решетки. При критических температурах, значение которых зависит от процентного содержания углерода, происходит распад карбида железа, образуется раствор углерода в железе – аустенита. При медленном остывании аустенит постепенно распадается, и кристаллическая решетка приобретает исходное состояние. Если углеродистые стали охлаждать с высокой скоростью, то в зависимости от режима закалки в них образуются различные фазовые состояния, самый прочный из которых – мартенсит. Но, к сожалению, он обладает повышенной хрупкостью, которая возрастает с увеличением содержания углерода в стали. Поэтому стали с мартенситной структурой необходимо подвергать отпуску, главная цель которого заключается в повышении пластичности и ударной вязкости закаленной стали.

Структура исследуемых образцов низколегированных сталей после закалки и последующего отпуска состоит из речного мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита. Мартенсит обеспечивает высокие прочностные свойства – такие, как твердость, временное сопротивление и устойчивость к абразивному износу. Остаточный аустенит отвечает за высокую пластичность и ударную вязкость. Дополнительное упрочнение достигается за счет добавки элементов, которые образуют карбонитриды, для измельчения структурных элементов речного мартенсита.

В качестве критерия оценки и сравнения материалов по износостойкости принята относительная износостойкость, определяемая отношением износа эталона к износу испытуемого образца с учетом плотности исследуемых материалов. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Анализируя данные таблицы 3, можно сказать, что наилучший результат по износостойкости достигнут для стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti (партия 2) с термической обработкой «Закалка» (рис. 2, 2*). Такой результат достигается за счет образования карбонитридов, обогащенных Nb. В результате получаем высокий предел прочности: $\sigma_B = 2170$ МПа. Эта же сталь с термической обработкой «Закалка и отпуск» имеет относительную износостойкость на 10,7% ниже, что объясняется происходящими в структуре стали фазовыми превращениями, которые незначительно уменьшают предел прочности $\sigma_B = 2040$ МПа, но повышают пластичность стали.

Таким образом, проведенные исследования показали широкий диапазон изменения износостойкости в зависимости от термической обработки. Существенный вклад в изменение износостойкости изученных сталей вносит карбидная фаза, которая весьма

чувствительна к изменению режимов термической обработки. Это дает возможность в сравнительно небольших интервалах изменения температур закалки

и отпуска воздействовать на структуру сталей, тем самым воздействовать на свойства, которые обеспечивают наибольшую износостойкость.

Таблица 3

Интенсивность абразивного изнашивания в зависимости от термической обработки*

Table 3

Abrasive wear intensity depending on the heat treatment*

Образец Sample	Твердость HV Hardness HV	Интенсивность износа, г/м Wear rate, g/m	Относительная износостойкость Relative wear resistance, K_n
Сталь 45/ Steel 45	202,4	0,1000	1,0000
65Г** / 65Г**	258,2	0,0965	1,0391
30ХГСА**/ 30CRSSA**	338,7	0,0958	1,0469
Партия 1 / Batch 1: * **	585,3 559,8	0,0638 0,0663	1,5710 1,5131
Партия 2 / Batch 2: * **	702,0 610,0	0,0581 0,0651	1,7252 1,5405
Партия 3 / Batch 3: * **	527,5 467,1	0,0876 0,0692	1,1449 1,4486
Партия 4 / Batch 4: * **	675,0 577,1	0,0630 0,0746	1,5917 1,3439

Примечание. Термическая обработка: * – закалка; ** – закалка + отпуск.

Note: Heat treatment: * – quenching; ** – quenching + tempering.

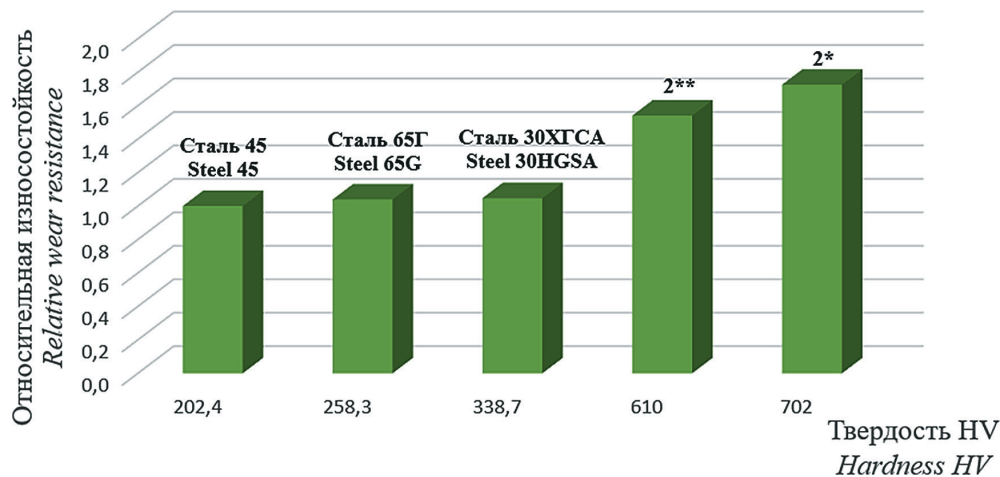


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости от твердости сталей при термической обработке «Закалка» и «Закалка + отпуск 280°C»

Fig. 2. Relationship between the relative wear resistance and hardness of steels during heat treatment “Quenching” and “Quenching + Tempering 280°C”

Выводы

1. Сталь 65Г, относительная износостойкость которой практически идентична износостойкости стали 45 (эталон), наиболее распространена при изготовлении рабочих органов сельскохозяйственных машин.

2. Из разработанных сталей наивысшую износостойкость в абразивной среде показала закаленная сталь 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti. Износостойкость разработанной стали в сравнении со сталью 65Г выше в 1,66 раза.

Список использованных источников

1. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их разработке // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 6. С. 56-62. EDN: ZWKXYF.
2. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупяттов Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с. EDN: YOKZJR
3. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: Монография. М.: ИНФРА-М, 2018. 155 с. EDN: YAOQRF
4. Долженко А.С., Долженко П.Д., Беляков А.Н., Кайбышев Р.О. Микроструктура и ударная вязкость высокопрочной низколегированной стали после темпформинга // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122, № 10. С. 1091-1100. EDN: XIONDW
5. Способ получения высокопрочной хромомолибденовой стали: Патент № 2779102 РФ, МПК C22C 38/22 (2006.01), C21D8/00 (2006.01) / А.Н. Беляков, С.М. Гайдар, О.Н. Дидманидзе, А.С. Долженко, В.А. Дудко, Р.О. Кайбышев. № 2021133384, заяв. 17.11.2021; опубл. 31.08.2022. 9 с. EDN: QRZCEE
6. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and strengthening mechanisms in an hsla steel subjected to tempforming. *Metals*. 2022;12(1):48. <https://doi.org/10.3390/met12010048>
7. Dolzhenko A., Kaibyshev R., Belyakov A. Tempforming strengthening of a low-alloy steel. *Materials*. 2022;15(15):5241. <https://doi.org/10.3390/ma15155241>
8. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S., Vetrova S., Kaibyshev R. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12(12):2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
9. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance: ASM International – Materials Park, Ohio, USA, 2005. 705 с перенос

Вклад авторов

М.Н. Ерохин – научное руководство, формулирование основных направлений исследования.
 С.М. Гайдар – научное руководство, формулирование общих выводов.
 Д.М. Скороходов – доработка текста и общих выводов.
 С.М. Ветрова – литературный анализ, обработка результатов исследования.
 А.С. Барчукова – обработка результатов исследования, подготовка рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; поступила после рецензирования и доработки 21.03.2023; принята к публикации 21.03.2023

References

1. Erokhin M.N., Novikov V.S. Forecasting durability of working elements of designed soil-cultivating machines. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;6:56-62. (In Rus.)
2. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Methods for modifying friction surfaces of machine parts: Monograph. Moscow, FGBOU VPO MGAU, 2014. 140 p. (In Rus.)
3. Novikov V.S. Ensuring the durability of the working tools of tillage machines: Monograph. Moscow, INFRA-M, 2019. 155 p. (In Rus.)
4. Dolzhenko A.S., Dolzhenko P.D., Belyakov A.N., Kaibyshev R.O. Microstructure and impact toughness of high-strength low-alloy steel after tempforming. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2021;122(10):1091-1100. (In Rus.)
5. Belyakov A.N., Gaidar S.M., Didmanidze O.N., Dolzhenko A.S., Dudko V.A., Kaibyshev R.O. Method for producing high-strength chromium-molybdenum steel: Patent No. 2779102 RF, IPC C22C38/22 (2006.01), C21D8/00 (2006.01). No. 2021133384, 2022. (In Rus.)
6. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and Strengthening Mechanisms in an HSLA Steel Subjected to Tempforming Metals. 2022;12:48. <https://doi.org/10.3390/met12010048>
7. Dolzhenko A., Kaibyshev R., Belyakov A. Tempforming strengthening of a low-alloy steel grade. *Materials*. 2022;15:5241. <https://doi.org/10.3390/ma15155241>
8. Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S., Vetrova S., Kaibyshev R. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel. *Metals*. 2022;12:2177. <https://doi.org/10.3390/met12122177>
9. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance: ASM International – Materials Park, Ohio, USA, 2005. 705 c.

Contribution of the authors

M.N. Erokhin – research supervision, conceptualization, formulation of the main research lines
 S.M. Gaidar – research supervision, formulation of general conclusions.
 D.M. Skorokhodov – text revision and general conclusions.
 S.M. Vetrova – literature review, processing of the research results.
 A.S. Barchukova – processing of the research results, preparation of the manuscript draft.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 27.02.2023; revised 21.03.2023; accepted 21.03.2023