ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5):35-44
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.9.015 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН

С.В. Севагин[1], А.П. Вержанский[2]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: sevaginsv@gmail.com
[2] НП «Горнопромышленники России», Москва, Россия

Аннотация: Представлен обзор причин износа штоков и гильз гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин и даны предложения по обеспечению высокого качества изготовления ответственных деталей рассматриваемых узлов. Подчеркивается связь ресурса соединений с показателями качества поверхностного слоя деталей пар трения. Отмечена важность выбора критериев оценки качества обработанной поверхности, оказывающих решающее значение в вопросах повышения износостойкости, а следовательно, и долговечности деталей узлов трения. В связи с этим наряду с параметрами шероховатости и регулярности микропрофиля поверхности деталей узлов трения предлагается также оценивать форму профиля шероховатости через коэффициент смятия профиля (КСП). В работе рассмотрены широко применяемые для пар трения методы отделочной обработки поверхностей, дана их сравнительная характеристика. Показано, что одними из наиболее эффективных методов финишной обработки элементов гидроцилиндров являются методы поверхностного пластического деформирования, и, в частности, алмазное выглаживание, обладающее наиболее широкими технологическими возможностями по обработке поверхностных слоев с различной твердостью, а также отличающееся простотой конструкции применяемой оснастки. Отмечены важные особенности метода и перспективы его применения в составе комбинированной обработки поверхности деталей, в том числе и при осаждении на них функциональных тонкопленочных покрытий.

Ключевые слова: погрузочно-доставочная машина, гидроцилиндр, шток, износ, качество поверхности, отделочная обработка, поверхностно-пластическое деформирование, шероховатость, микропрофиль.

Для цитирования: *Севагин С.В., Вержанский А.П.* Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 35–44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35.

Quality control in manufacture of hydraulic cylinder rods for load–haul–dumpers

S.V. Sevagin[1], A.P. Verzhansky[2]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: sevaginsv@gmail.com
[2] NP «Mining Industrialists of Russia», Moscow, Russia

© С.В. Севагин, А.П. Вержанский. 2021.

Abstract: The article offers a review of wear causes of hydraulic cylinder rods and barrels for load–haul–dumpers and makes proposals on higher manufacturing quality control of these parts. The connection between the life of joint assemblies and the surface layer quality is emphasized for the parts of friction couples. The importance of the properly selected criteria for the machined surface quality is highlighted as this choice is decisive for the increase in wear resistance and, consequently, in endurance of parts in friction assemblies. In this respect, alongside with microprofile roughness and regularity of parts in friction assemblies, it is proposed to estimate profile roughness using the bearing ratio. The widely applied methods of final surface finish of friction couples are discussed and compared. The most efficient methods of surface finish for the parts of hydraulic cylinders are the methods of plastic deformation of their surface, in particular, diamond smoothening which possesses high technological capabilities in treatment of various hardness surfaces and features simple accessories. The characteristics of the method and the prospects for its application in surface machining of parts in combination with other techniques, including parts with functional thin film coatings, are described.

Key words: load–haul–dumper, hydraulic cylinder, rod, wear, surface quality, finish machining, plastic surface layer deformation, roughness, microprofile.

For citation: Sevagin S. V., Verzhansky A. P. Quality control in manufacture of hydraulic cylinder rods for load–haul–dumpers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):35-44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35.

Введение

Задачи повышения надежности и эффективности эксплуатации горных машин являлись и остаются наиболее значимыми как для разработчиков и производителей горной техники, так и для заказчиков-потребителей горного оборудования. В связи с этим особое внимание при проектировании машин уделяют выявлению и исследованию наиболее нагруженных и уязвимых узлов [1–4], а в процессе изготовления и ремонта решают вопросы повышения качества и долговечности оборудования с применением современных материалов и прогрессивных технологических методов [5–8].

В погрузочно-доставочных машинах (ПДМ) широко применяются гидромеханические агрегаты (гидроприводы), в частности, объемные гидроцилиндры. Известно, что ПДМ работают в чрезвычайно жестких условиях эксплуатациях, характеризующихся высокими динамическими и статическими нагрузками, вибрациями, перепадами температур, запыленностью, агрессивностью шахтных вод и др. В связи с этим данные машины должны обладать высокой надежностью и долговечностью для обеспечения возможности их эффективной эксплуатации.

Учитывая высокую трудоемкость изготовления и ремонта гидроцилиндров ПДМ, особую значимость и важность приобретают поиск и разработка эффективных технологических методов обработки, обеспечивающих высокую несущую способность поверхностных слоев деталей соединений, эксплуатирующихся в условиях интенсивного трения, циклического нагружения и воздействия коррозионных сред.

Анализ причин отказов гидроцилиндров

Ресурс и надежность гидроцилиндров во многом зависит от комплекса эксплуатационных свойств поверхностного

слоя деталей соединений, который определяется, прежде всего, правильным выбором материалов для деталей соединений, видом применяемой термической обработки и, безусловно, качеством проведения механической обработки, в особенности, на заключительных этапах технологического процесса — на стадии отделочной обработки.

Производственный опыт эксплуатации ПДМ, а также анализ статистических данных показали, что на отказы гидроцилиндров приходится 40…50% отказов всей машины [9].

В процессе эксплуатации гидравлического оборудования возникают неисправности, нарушающие работоспособность гидроцилиндров. Последнее приводит к необходимости закупать и иметь в оперативном запасе значительное число данных узлов для предотвращения простоя горной техники.

Анализ машин, поступающих в ремонт, показал, что основными причинами выхода из строя соединений гидроцилиндра ПДМ являются коррозия, различные механические повреждения в виде царапин, выбоин, сколов, задиров на штоках и гильзах, возникающих в результате как внешнего механического воздействия, так и загрязнения жидкости внутри всей гидравлической системы узла.

Также для поршневых гидроцилиндров характерен неравномерный износ по трибосопряженной поверхности из-за наличия зазоров в парах трения. При износе изменяется форма исполнительной поверхности штока, что нарушает работоспособность сопряжения в целом [8].

Ускоренный износ элементов гидроцилиндров определяется прежде всего: отсутствием надежной системы изоляции направляющих поверхностей от загрязнений; несовершенством применяемых смазочных материалов; частыми остановками и реверсированием движения; переменным характером трения различных участков исполнительных поверхностей по длине [1, 8]. Вследствие наличия реверсивного движения в поверхностных слоях сопряженных тел зарождаются сдвиговые деформации по причине последовательных чередований зон сжатия и растяжения, что неизбежно приводит к увеличению силы трения и упругих деформаций за пределами участков контакта материалов трибосопряжения. По причине реверсивного движения изменяется и характер пластического деформирования. Знакопеременные нагружения ускоряют процесс образования дефектов структуры.

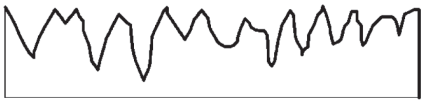
Под воздействием циклических нагрузок в условиях граничной смазки, характерной для соединений гидроцилиндра, масляная пленка быстро разрушается, что приводит к непосредственному контакту металлических поверхностей деталей соединений.

До 55% случаев выхода из строя гидроцилиндров происходит из-за износа уплотнительных колец штоковой полости. Установлено, что разрушение уплотнительной системы происходят под влиянием качественных показателей поверхностностей деталей штока, не соответствующих условиям трения. Последние определяются реализуемым при изготовлении штоков технологическим процессом и методами достижения требуемых параметров шероховатости поверхности. Остановимся на рассмотрении данного вопроса подробнее.

Выбор параметра поверхности профиля

Характеристики, которые используют для установления требований к качеству обработанной поверхности, описаны в DIN EN ISO 4287. При этом следует отметить, что из параметров шероховатости на чертежах чаще всего указыва-

Профили поверхностей
Surface profiles

Форма профиля поверхности	**Профиль поверхности**	***Ra*, мкм**	***Rz*, мкм**	***Rmr*, %**
Форма замкнутого профиля		0,1	1,0	70
Форма открытого профиля		0,2	1,0	15

ют требуемые значения *Ra* или *Rz*, редко *Rmax*. Несмотря на такое число параметров, на самом деле этих характеристик недостаточно для оценки качества поверхностей деталей, работающих в парах трения. Замечено, что показатели *Ra* и *Rz* сами по себе не дают достаточного представления о микропрофиле поверхности, поскольку важно оценивать не только высоту профиля поверхности, но и форму профиля шероховатости поверхности трения в соответствии с DIN EN ISO 4287 и EN ISO 16610-21. Для деталей узлов трения более важное значение приобретает коэффициент смятия профиля (КСП) *Rmr* (материальный коэффициент профиля *Rmr*(*c*) EN ISO 4287 и EN ISO 16610-21), который в большей степени и определяет условия контакта пар трения и долговечность уплотнительных поверхностей. Микропрофили, наиболее благоприятные для трибосопряжений, показаны в таблице.

Коэффициент смятия профиля (КСП) *Rmr* (материальный коэффициент профиля *Rmr*(*c*)) представляет собой отношение опорной длины элементов профиля на заданном уровне сечения с выше средней линии в микрометрах к базовой длине оценки профиля.

Так, например, в таблице приведены два профиля, каждый из которых имеет почти одинаковые показатели по *Rz* и *Ra*. Разница в несущей способности поверхности становится очевидной, лишь когда сравниваются профили микрогребешков контактных поверхностей деталей по параметру *Rmr*. Так, форма замкнутого профиля с КСП *Rmr* = 70%, обеспечивает лучшие условия контакта при работе пары трения и, следовательно, более высокую износостойкость деталей [10].

Большое значение имеет способность трущейся поверхности сохранять под нагрузкой масляную пленку, т.е. противостоять возникновению очагов непосредственного контакта металлических поверхностей. И в этом случае детали со сглаженной формой профиля микрогребешков демонстрируют большую эффективность. В связи с этим на отделочных этапах процессов изготовления деталей пар трения должны применяться такие методы обработки, которые обеспечивали бы не только заданные чертежом высотные параметры шероховатости поверхности, но и требуемый микрорельеф.

Результаты экспериментальных исследований

Комплекс эксплуатационных свойств штока гидропривода ПДМ обеспечивается поэтапно выполнением закалкой ТВЧ, хромированием и отделочной обработкой. При этом окончательный микропрофиль рабочей поверхности достигается полированием, что является разновидностью тонкой абразивной обработки.

В результате проведенных исследований было выявлено, что при достигаемом параметре шероховатости поверхности *Ra* = 0,32 мкм, коэффициент смятия профиля *Rmr* не превышает 15%, что не соответствует условиям трибоконтакта штока с уплотнением грундбуксы и требует поиска альтернативных методов отделочной обработки. Оценка параметров микропрофиля поверхности нового штока проводилась с помощью современного профилометра модели «Mitutoyo SJ-310» (Япония).

Известно, что эксплуатационные свойства деталей машин и надежность их работы в значительной степени зависят от качества их изготовления [11] и, главным образом, от технологии и методов выполняемой отделочной обработки, в процессе которых и формируются требуемые параметры поверхностного слоя деталей [11 — 15].

Как показали экспериментальные исследования [16 — 20], поверхности, обработанные без снятия стружки, имеют в этом отношении несомненные преимущества по сравнению с абразивной и лезвийной обработкой. Удельные давления схватывания и заедания при трении сглаженной поверхности значительно выше аналогичных, обработанных резанием.

В связи с этим для повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин на практике успешно используют отделочно-упрочняющую обработку одним из методов поверхностного пластического деформирования (ППД), которые позволяют обеспечить требуемый микропрофиль и регулярный микрорельеф поверхностей трения. Причем свою целесообразность методы ППД показали как при изготовлении, так и в ремонтном производстве при восстановлении деталей [12].

Для деталей горных машин наибольшие применение нашли такие методы ППД, как обкатка роликами, виброкатывание и алмазное выглаживание [12 — 15].

Поверхностное пластическое деформирование посредством обкатки роликами позволяет в полной мере реализовать свойства конструкционных сталей и особенно эффективно при проведении поверхностного упрочнения незакаленных сплавов.

Данный метод достаточно широко применяют для упрочнения нагруженных осей колесных пар железнодорожных вагонов, а также роторов турбины и генераторов, крупногабаритных валов на локальных участках концентрации

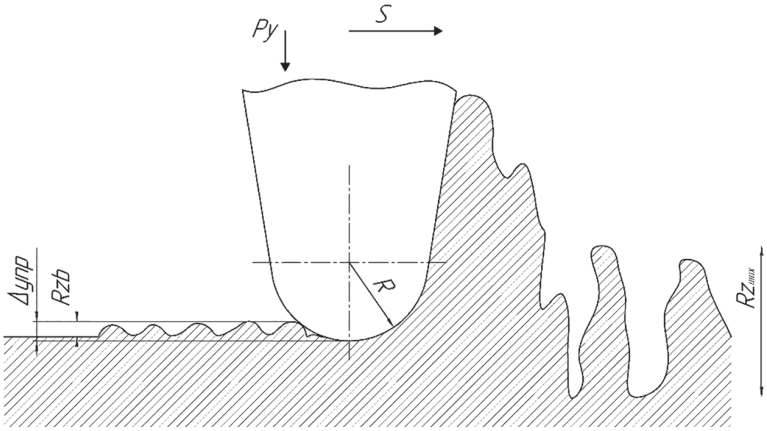


Рис. 1. Схема процесса поверхностного пластического деформирования поверхности при выглаживании
Fig. 1. Plastic deformation flowchart in surface smoothening

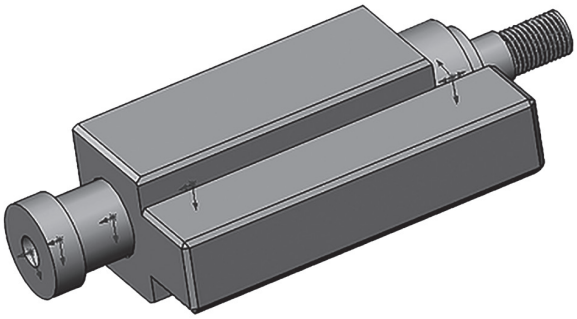


Рис. 2. 3D-модель упругой оправки для алмазного выглаживания
Fig. 2. 3D model of flexible tooling for diamond smoothening

напряжений. Метод успешно применяют в ремонтном производстве с целью упрочнения посадочных шеек валов после аварийных задиров [14].

Алмазное выглаживание является наиболее эффективным, простым в реализации и высокопроизводительным методом отделочно-упрочняющей обработки. Сущность процесса заключается в пластическом деформировании поверхности скользящим по ней инструментом [12, 13]. Процесс протекает в условиях трения скольжения. При этом в качестве инструмента-индентора используется алмазный кристалл, закрепленный в упругой или жесткой оправке (рис. 1). Алмазным выглаживанием достигаются требуемые параметры шероховатости поверхности, упрочнение поверхностного слоя и повышение точности размеров деталей.

К высокопроизводительным способам ППД относят также виброобкатывание шарами и вибровыглаживание. При этом помимо продольной подачи S (как в случаях обкатывания или выглаживания) деформирующему инструменту-индентору, наряду с усилием деформирования P, сообщается дополнительно возвратно-поступательное перемещение с частотой N и амплитудой l вдоль оси детали, вращающейся с частотой n. Если при обкатывании и выглаживании инструмент выдавливает винтовую ка-

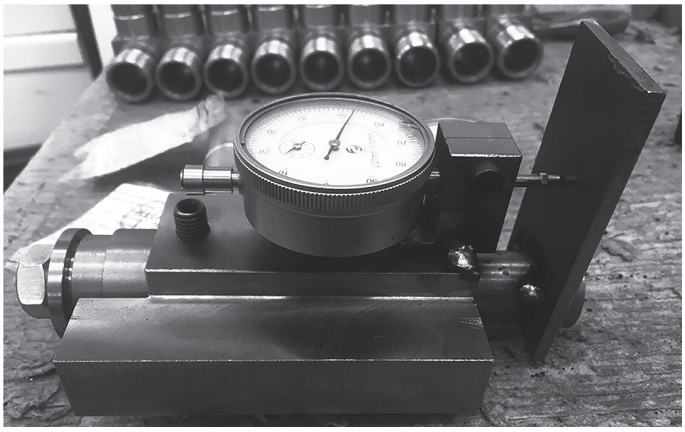


Рис. 3. Оправка для алмазного выглаживания, изготовленная в производственных условиях завода ООО «ПСК ПластМеталл»
Fig. 3. Diamond smoothening tooling manufactured at PSK PlastMetal Works

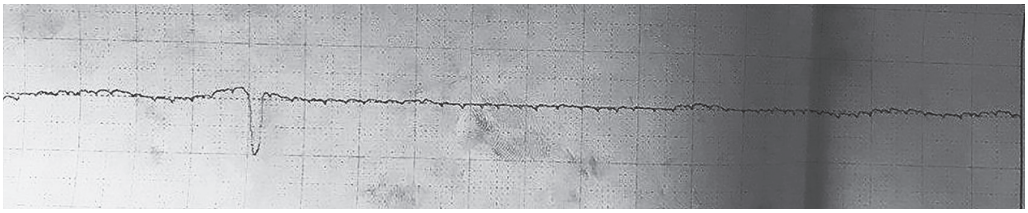


Рис. 4. Профилограмма поверхности образца, обработанной алмазным выглаживанием после хромирования
Fig. 4. Surface profilogram of sample after post-chroming diamond smoothening

навку, то при виброобкатывании (вибровыглаживании) — синусоидальную канавку с регулярным микропрофилем.

Принимая во внимание высокую твердость поверхностного слоя штоков после хромирования, значение которой находится в пределах 60—62 HRC, из процессов, рассмотренных выше, наиболее эффективным для отделочной обработки штоков является алмазное выглаживание.

Целесообразность применения для штоков алмазного выглаживания подтверждается экспериментальными исследованиями, для проведения которых было подготовлено 6 цилиндрических образцов диаметром 26 мм при длине 100 мм из стали 40Х, применяемой для изготовления штоков. Для реализации процесса была изготовлена специальная технологическая оснастка — упругая оправка (рис. 2, 3).

Алмазное выглаживание проводилось на токарном станке с ЧПУ сразу после хромирования. В результате обработки ППД шероховатость *Ra* поверхности образцов составила 0,2...0,26 мкм (рис. 4), КСП *Rmr* в пределах 70—75%, при этом степень упрочнения поверхностного слоя не превышала 28%.

Дальнейшее развитие исследований

Таким образом, введение в технологический процесс изготовления штоков отделочной обработки алмазным выглаживаением открывает большие возможности в плане увеличения несущей способности поверхностного слоя штоков и долговечности сопрягаемых с ними уплотнительных элементов и, следовательно, увеличения ресурса гидроцилиндров ПДМ. В дальнейшем предполагается проведение серии натурных экспериментов, направленных на исследование износостойкости штоков, обработанных алмазным выглаживанием, и применяемых уплотнений.

Заключение

1. Условия эксплуатации гидроцилиндров ПДМ приводят к интенсивному износу элементов ответственных соединений и ставят задачу технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей при помощи эффективных методов отделочной обработки.

2. Для повышения эксплуатационных свойств деталей трибосопряжений целесообразным является получение замкнутой формы профиля шероховатости поверхности с КСП не менее 70%, что в полной мере возможно обеспечить отделочной обработкой ППД.

3. Установлено, что для штоков гидроприводов ПДМ, эксплуатирующихся в жестких условиях, в качестве отделочной обработки вместо полирования предпочтительнее применять алмазное выглаживание, которое обеспечивает получение требуемого микропрофиля поверхности с шероховатостью *Ra* 0,2 мкм и КСП в пределах 70—75% наряду с упрочнением поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова П. В.*, *Иванов С. Л.*, *Кувшинкин С. Ю.*, *Шибанов Д. А.* Системы организации стратегии технического обслуживания и ремонта горных машин / Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Вып. II. — СПб., 2015. — С. 46—48.

2. *Gubanov S., Petsyk A., Komissarov A.* Simulation of stresses and contact surfaces of disk rolling cutters with the rock when sinking in mixed Soils // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 177. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703008.

3. *Секретов М. В.*, *Губанов С. Г.* Методика расчета нагрузок в приводе вертикальной подачи штрипсового станка с выпуклой траекторией распиливания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 2. — С. 136—145. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-136-145.

4. *Рахутин М. Г.*, *Бойко П. Ф.* Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. — 2019. — № 12. — С. 49—51. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-12-49-52.

5. *Сурина Н. В.*, *Мнацаканян В. У.* Система автоматизированного проектирования технологических процессов при ремонте горной техники // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 89–94. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.08.

6. *Бойко П. Ф.*, *Титиевский Е. М.*, *Тимирязев В. А.*, *Мнацаканян В. У.*, *Хостикоев М. З.* Обеспечение долговечности броней дробилок путем применения новых технологий их изготовления и диагностирования износа // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2019. — № 5(113). — С. 42—47. DOI: 10.33285/1999-6934-2019-5(113)-42-47.

7. *Бойко П. Ф.*, *Титиевский Е. М.*, *Тимирязев В. А.*, *Мнацаканян В. У.* Повышение долговечности и диагностика состояния броней конусных дробилок большой единичной мощности // Горный журнал. — 2019. — № 4. — С. 65–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.14.

8. *Радайкина Е. А.* Совершенствование технологии ремонта силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники применением композитов: Дис. кан. тех. наук. — Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2018. — 162 с.

9. *Масляков Н. С.* Обоснование и разработка метода повышения технической готовности при эксплуатации погрузочно-доставочных машин: Дис. кан. тех. наук. — М.: НИТУ «МИСиС», 2016. — 169 с.

10. *Уплотнения* Trelleborg Sealing Solutions: [сайт]. URL: https://trelleborgseals.ru/.

11. *Bardovskiy A. D.*, *Gorbatyuk S. M.*, *Keropyan A. M.*, *Bibikov P. Y.* Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of article motion on the disk surface // Journal of Friction and Wear. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 326—329. DOI: 10.3103/S1068366618040037.

12. *Одинцов Л. Г.* Упрочнение и отделка деталей ППД. Справочник. — М.: Машиностроение, 1987, 328 p.

13. *Торбило В. М.* Алмазное выглаживание. — М.: Машиностроение, 1972. — 104 с.

14. *Браславский В. М.* Технология обкатки крупных деталей роликами. — М.: Машиностроение, 1975. — 160 с.

15. *Sevagin S. V., Mnatsakanyan V. U.* Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044095.

16. *Shailesh Dadmal, Vijay Kurkute* Finite element analysis of roller burnishing process // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017, vol. 4, no. 6, pp. 2294—2301.

17. *Pattabhi Reddy B., Shashikanth C.* Investigations in contact stress analysis in roller burnishing process // International Journal & Magzine of Engineering, Technology, Management and Resource. 2015, vol. 2, pp. 1502—1516.

18. *Solanki R. G., Patel K. A., Dhruv R. B.* Parametric optimization of roller burnishing process for surface roughness // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2016, vol. 13, pp. 21 – 26.

19. *Nikhil Shinde, Kurkuter V. K.* Optimization of single roller burnishing operation for surface roughness of aluminium alloy using artificial neural network // International Journal of Mechanical Engineering. 2016, vol. 43, no. 2, pp. 1289 – 1293.

20. *Rashish Deshmukh P.* Analyasis and optimization of roller burnishing process on cylindrical surfacemicro hardness of aluminium alloy // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015, vol. 4, no. 7, pp. 6044 – 6055. ГИАБ

REFERENCES

1. Ivanova P. V., Ivanov S. L., Kuvshinkin S. Yu., Shibanov D. A. Systems for organizing the strategy of maintenance and repair of mining machines. *Aktual'nye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom*. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Vyp. II [Actual problems of technical sciences in Russia and abroad. Collection of scientific papers on the results of the international scientific and practical conference. Issue II], Saint-Petersburg, 2015, pp. 46 – 48. [In Russ].

2. Gubanov S., Petsyk A., Komissarov A. Simulation of stresses and contact surfaces of disk rolling cutters with the rock when sinking in mixed Soils. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 177. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703008.

3. Sekretov M. V., Gubanov S. G. Load calculation technique for vertical feed drive of curve strip sawing machine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2019, no. 2, pp. 136 – 145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-136-145.

4. Rakhutin M. G., Boyko P. F. Ways to improve methods for assessing the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2019, no. 12, pp. 49 – 51. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-12-49-52.

5. Surina N. V., Mnatsakanyan V. U. Computer-aided design of technological processes in the repair of mining equipment. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 89–94. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.08.

6. Boyko P. F., Titievsky E. M., Timiryazev V. A., Mnatsakanyan V. U., Khostikoev M. Z. Provision of operational life-time period of crushers liners by applying new technologies of their manufacturing and wear-out diagnosing. *Equipment and technologies for oil and gas complex*. 2019, no. 5(113), pp. 42 – 47. DOI: 10.33285/1999-6934-2019-5(113)-42-47.

7. Boyko P. F., Titievsky E. M., Timiryazev V. A., Mnatsakanyan V. U. Increasing the durability and diagnostics of the condition of the armor of cone crushers of high unit power. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 4, pp. 65–69. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.14.

8. Radaykina E. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii remonta silovykh gidrotsilindrov sel'skokhozyaystvennoy tekhniki primeneniem kompozitov* [Improvement of the technology of repair of hydraulic power cylinders of agricultural machinery using composites], Candidate's thesis, Saransk, MGU im. N.P. Ogareva, 2018, 162 p.

9. Maslyakov N. S. *Obosnovanie i razrabotka metoda povysheniya tekhnicheskoy gotovnosti pri ekspluatatsii pogruzochno-dostavochnykh mashin* [Justification and method for improving technical readiness during the operation of LHD machines], Candidate's thesis, Moscow, NITU «MISiS», 2016, 169 p.

10. *Uplotneniya Trelleborg Sealing Solutions*, available at: https://trelleborgseals.ru/.

11. Bardovskiy A. D., Gorbatyuk S. M., Keropyan A. M., Bibikov P. Y. Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of article motion on the disk surface. *Journal of Friction and Wear*. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 326 – 329. DOI: 10.3103/S1068366618040037.

12. Odintsov L. G. *Uprochnenie i otdelka detaley PPD*. Spravochnik [Strengthening and finishing of PPD parts], Moscow, Mashinostroenie, 1987, 328 p.

13. Torbilo V. M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing], Moscow, Mashinostroenie, 1972, 104 p.

14. Braslavskiy V. M. *Tekhnologiya obkatki krupnykh detaley rolikami* [Roller rolling technology for large parts], Moscow, Mashinostroenie, 1975, 160 p.

15. Sevagin S. V., Mnatsakanyan V. U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines. I*OP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 709. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044095.

16. Shailesh Dadmal, Vijay Kurkute Finite element analysis of roller burnishing process. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017, vol. 4, no. 6, pp. 2294 — 2301.

17. Pattabhi Reddy B., Shashikanth C. Investigations in contact stress analysis in roller burnishing process. *International Journal & Magzine of Engineering, Technology, Management and Resource*. 2015, vol. 2, pp. 1502 — 1516.

18. Solanki R. G., Patel K. A., Dhruv R. B. Parametric optimization of roller burnishing process for surface roughness. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016, vol. 13, pp. 21 — 26.

19. Nikhil Shinde, Kurkuter V. K. Optimization of single roller burnishing operation for surface roughness of aluminium alloy using artificial neural network. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2016, vol. 43, no. 2, pp. 1289 — 1293.

20. Rashish Deshmukh P. Analyasis and optimization of roller burnishing process on cylindrical surfacemicro hardness of aluminium alloy. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015, vol. 4, no. 7, pp. 6044 — 6055.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Севагин Сергей Васильевич — аспирант,
НИТУ «МИСиС», e-mail: sevaginsv@gmail.com,
Вержанский Александр Петрович — генеральный директор,
НП «Горнопромышленники России»,
e-mail: info@rosgorprom.com,
Для контактов: Севагин С.В., e-mail: sevaginsv@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.V. Sevagin, Graduate Student,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: sevaginsv@gmail.com,
A.P. Verzhansky, General Director,
NP «Mining Industrialists of Russia»,
Moscow, Russia, e-mail: info@rosgorprom.com.
Corresponding author: S.V. Sevagin, e-mail: sevaginsv@gmail.com.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 19.01.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 15.12.2020; received after the review 19.01.2021; accepted for printing 10.04.2021.