

Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива

В.В. Зотов✉, В.У. Мнацаканян, М.М. Базлин, В.С. Лакшинский, Е.В. Дятлова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ zotov@misis.ru

Резюме: В статье рассмотрены основные причины отказов центробежных насосов, используемых в установках шахтного водоотлива. Проанализированы факторы, вызывающие интенсивный износ рабочих колес насосов типа ЦНС-33-66...330, а также способы повышения их работоспособности, из которых наиболее перспективным и эффективным признан метод холодного газодинамического напыления (ХГН) функциональных покрытий, при помощи которого представляется возможным улучшить состояние поверхностного слоя и устранить поверхностные дефекты исходных заготовок рабочих колес, оказывающие существенное влияние на работоспособность деталей. Отмечены основные направления работ в исследуемой области, приведены практические рекомендации по использованию метода холодного газодинамического напыления как при производстве насосов, так и в процессе их восстановительного ремонта. Показано, что одним из перспективных направлений развития работ с использованием ХГН-процесса является создание на лопастях рабочих колес многослойных покрытий на основе композиций различных металлокерамических порошков, что позволит наряду с уплотняющей обработкой сообщать рабочим колесам комплекс необходимых функциональных характеристик для условий гидроабразивного изнашивания.

Ключевые слова: центробежные насосы, причины отказов, рабочее колесо, поверхностный слой, коррозия, износ, дефекты литья, холодное газодинамическое напыление

Для цитирования: Зотов В.В., Мнацаканян В.У., Базлин М.М., Лакшинский В.С., Дятлова Е.В. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива. *Горная промышленность*. 2024;(2):143–146. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146>

Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines

V.V. Zotov✉, V.U. Mnatsakanyan, M.M. Bazlin, V.S. Lakshinsky, E.V. Dyatlova

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ zotov@misis.ru

Abstract: Mining The article discusses the main failure causes of centrifugal pumps used in the mine dewatering plants. The factors causing intensive wear of the impellers used in centrifugal pumps of the CNS-33-66...330 type are analysed, as well as the ways of increasing their serviceability. The gas dynamic cold spraying is recognized as the most promising and efficient method of applying functional coatings, which makes it possible to improve the condition of the surface layer and eliminate surface defects of the initial impeller blanks, which have a significant impact on the serviceability of the parts. The main research trends are outlined in the studied area, and practical recommendations are provided on using the gas dynamic cold spraying method both in the pump manufacturing process and in their overhaul. It is shown that one of the promising trends in development the gas dynamic cold spraying applications is the creation of multilayer coatings on the impeller blades based on compositions of various metal-ceramic powders. Along with the hardening treatment, this combination will allow to provide the impellers with a set of necessary functional characteristics for the hydro-abrasive wear conditions. technological process as a sequence of changing the natural state of the Earth's subsoil to obtain a certain quantity and quality of mineral products is characterized by departures from the specified normative parameter values, which is due to causes of different nature. Most of these causes are man-made, and they are created during the performance of specific process operations by the personnel. The article presents an original approach to managing the control over the technological process parameters in a coal strip mine. To reduce the magnitude and probability of the process departures from the normative values, the authors propose to create technical and organizational control loops. Each loop is a closed chain of technical means and organizational tools, which secures up-keeping of the normative technological process state. Production risk is proposed to be used as a criterion to assess the efficiency of the control loops. The methodology allowing to calculate the risk is described. The results of the contour approach application to the technological process control at the Solntsevsky coal strip mine are presented.

Keywords: centrifugal pumps, failure causes, impeller, surface layer, corrosion, wear, casting defects, gas dynamic cold spraying

For citation: Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M., Lakshinsky V.S., Dyatlova E.V. Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):143–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146>

Введение

В горной промышленности центробежные насосы занимают важное место, обеспечивая эффективный процесс водоотлива на различных этапах работ, выполняемых в угольных шахтах и рудниках. Рабочие колеса данных насосов представляют собой ключевые элементы конструкции, определяющие их надежность, производительность и долговечность в условиях, часто характеризующихся наличием агрессивных жидкостей и абразивных сред, а также высокой интенсивностью эксплуатации. До 40% отказов центробежных насосов вызвано гидроабразивным износом поверхности рабочих колес и кавитацией. Опыт эксплуатации насосов показывает, что наиболее сильному износу подвергаются лопасти рабочих колес у входной кромки и на выходном участке с рабочей стороны [1–5]. Потеря геометрии профиля колеса существенно влияет на изменение технических характеристик насоса, в связи с чем данный узел можно считать лимитирующим.

Интенсивному изнашиванию также подвержены корпус и вал насоса, с которыми связано соответственно до 30 и 20% отказов стационарного оборудования. В.М. Попов в своих работах отмечает, что наличие достаточно большого количества механических примесей в шахтной воде значительно повышает износ щелевых уплотнений насосов [6–8].

Таким образом, при установленной производителем наработке до капитального ремонта центробежных насосов 6500 часов их фактическая наработка не превышает 1000 час [1; 9; 10], что вызвано интенсивными условиями эксплуатации и износом деталей.

Эти обстоятельства приводят к необходимости изыскания и разработки эффективных конструкторско-технологических и иных предложений, направленных на повышение ресурса рабочих колес и других быстроизнашиваемых элементов ответственных соединений. При этом в каждом отдельном случае необходимо учитывать особенности технологии изготовления деталей соединений и специфику применяемых материалов.

Следует признать, что ряд актуальных вопросов в области совершенствования гидравлических систем горных машин и оборудования сопутствующих производств успешно решаются в настоящее время численными методами с использованием сложных цифровых моделей. При помощи программного моделирования и симуляции взаимодействия потоков жидкостей с рабочими элементами гидросистем и насосов выявляют рациональные конструктивные параметры ответственных узлов, их ресурсные показатели с учетом ряда специфических эксплуатационных факторов – температурных, скоростных и др. [11–19].

Вместе с тем при моделировании исследуемые объекты часто идеализируют. Крайне сложным представляется учет в цифровых моделях таких параметров, как шероховатость поверхности деталей, пористость на поверхности или наличие в изделиях производственных дефектов. В связи с этим при решении вопросов повышения ресурса центробежных насосов технологическими методами наряду с возможностью моделирования возникает необходимость оценки исходного состояния объекта исследования с последующим экспериментальным подтверждением правомочности того или иного рекомендуемого метода повышения ресурса оборудования.

Особенности состояния поверхностного слоя рабочих колес

Анализ состояния пяти рабочих колес центробежного

секционного насоса модели ЦНС-33-66...330 ООО «Ясногорский насосный завод» (Россия, Тульская область) позволил выявить ряд особенностей поверхностного слоя деталей, обусловленных технологией их изготовления.

Для производства рабочих колес и корпусов насоса используется серый чугун марки СЧ20 (ГОСТ 1412–85). Данный материал, безусловно, обладает хорошими литейными свойствами, в частности, высокой жидкотекучестью, малой линейной усадкой, что позволяет получать фасонные заготовки практически любым способом литья. Между тем, заготовки рабочих колес рассматриваемого насоса изготавливают методом литья в песчано-глинистые формы (ПГФ), одним из существенных недостатков которого является низкое качество поверхностного слоя отливок, а также высокая вероятность образования на поверхности газовых раковин и рыхлой структуры. Так, на рабочей поверхности колеса при его визуальном осмотре выявлены развитая пористость (рис. 1, а) и грубая шероховатость поверхности с высотой микронеровностей в пределах 320...160 мкм, что характерно для реализуемого способа литья. Данный фактор, безусловно, оказывает негативное влияние на работоспособность детали в условиях гидроабразивного износа и кавитации, поскольку рыхлая корка резко снижает несущую способность поверхностного слоя. Каждую пору можно рассматривать как концентратор напряжений, снижающий прочностные свойства конструкции и способствующий отрыву частиц материала поверхности при встрече с гидроабразивным потоком.

Наряду с этим на периферийной части лопастей рабочего колеса по наружному диаметру были выявлены тонкие трещины, обусловленные, вероятно, термическими напряжениями, возникающими в процессе литья заготовки, которые проявились на этапе выполнения механической обработки детали. Данный производственный дефект су-



Рис. 1
Рабочее колесо центробежного насоса модели ЦНС 33-66...330: а – грубая шероховатость и рыхлая структура поверхностного слоя, снижающая сопротивляемость лопаток гидроабразивному износу; б – трещина на ободе рабочего колеса центробежного насоса, вскрытая в процессе механической обработки

Fig. 1
Impeller of model CNS 33-66...330 centrifugal pump: а – the orange-peel defect and porous open-grain structure of the surface layer that reduce the blade resistance to the hydroabrasive wear; б – a crack on the rim of the centrifugal pump impeller, opened during the machining process

щественно снижает несущую способность колеса и может стать первопричиной ускоренного разрушения лопасти.

Направления повышения ресурса рабочих колес

Известно, что решающую роль в вопросах повышения ресурса играет состояние поверхностного слоя детали, определяемое комплексом свойств материала поверхностного слоя и качеством поверхности, достигаемым в процессе получения заготовки и при ее последующей механической обработке [20; 21]. При этом одним из важнейших параметров качества, характеризующих износостойкость поверхности, является шероховатость. Из последнего следует, что повысить сопротивляемость рабочих колес гидроабразивному износу и коррозии возможно при помощи реализации следующих конструкторских и технологических решений:

- использование для рабочих колес материалов, обладающих повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью;

- использование для получения заготовок рабочих колес специальных методов литья, обеспечивающих более высокую геометрическую точность детали и качество ее поверхности, а также снижающих вероятность образования поверхностных дефектов;

- модифицирование поверхностей рабочих колес различными методами (химико-термической обработкой, магнитно-импульсной обработкой и др.);

- упрочнение и уплотнение изнашиваемых элементов насосов нанесением функциональных покрытий.

Каждый из вариантов может быть реализован как самостоятельно, так и в сочетании с другими приведенными методами. Применительно к рассматриваемым образцам рабочих колес, в силу характера существующего стабильного

производственного процесса их изготовления, реализация первых трех предложений маловероятна и нерациональна, так как это сопряжено со значительным увеличением производственных затрат.

Очевидно, что при выборе уплотняющих и упрочняющих функциональных покрытий, а также методов их нанесения, следует отдавать предпочтение способам, позволяющим гарантированно устранять возможные дефекты литья без интенсивного нагрева обрабатываемой поверхности. С этой точки зрения наиболее эффективным способом является холодное газодинамическое напыление (ХГН) покрытий на металлической основе, обеспечивающее герметизацию пор, а также возможность заделки производственных дефектов в виде трещин [22]. Ни один из существующих методов нанесения покрытий таким комплексом характеристик и технологических возможностей не обладает.

При помощи холодного газодинамического напыления можно формировать многослойные покрытия из различных металлокерамических композиций на основе алюминия, меди, никеля и других металлов, тем самым обеспечивая необходимые функциональные характеристики поверхностного слоя рабочих колес и других элементов насосного оборудования, как при их производстве, так и в процессе ремонта.

Заключение

Для повышения ресурса рабочих колес центробежных насосов ЦНС-33-66...330, изготовленных из серого чугуна СЧ 20 литьем в ПГФ, целесообразно применять дополнительную обработку методом холодного газодинамического напыления с целью улучшения состояния и качества поверхностного слоя и устранения возможных дефектов литья.

Список литературы / References

1. Долганов А.В., Тимухин С.А. *Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива*. М.: Академия Естествознания; 2016. 180 с.
2. Паламарчук Т.Н. Обоснование бескавитационных режимных параметров насосного оборудования водоотливных комплексов угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. Тула; 2019. 205 с.
3. Долганов А.В. Гидроабразивный износ и экономичность водоотливных установок шахт и рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S9):3–8. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-3-8>
Dolganov A.V. Hydroabrasive wear and profitability of water-drainage installations in mines and ore mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S9):3–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-3-8>
4. Бондаренко С.И., Демьянец К.А. Исследование гидроабразивной износостойкости серых и высокопрочных чугунов, микролегированных оловом и сурьмой. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2008;(42):90–93.
Bondarenko S.I., Demyanets K.A. Hydroabrasive wear resistance investigation of gray and high-strength cast irons microalloyed with SB and SN. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2008;(42):90–93. (In Russ.)
5. Долганов А.В. Повышение энергоэффективности при эксплуатации комплексов шахтного водоотлива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S9):16–23. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23>
Dolganov A.V. Energy efficiency improvement during operation of mine waterlets. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S9):16–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23>
6. Попов В.М. *Рудничные водоотливные установки*. 2-е изд. М.: Недра; 1983. 304 с.
7. Попов В.М. *Шахтные насосы (теория, расчет и эксплуатация)*. М.: Недра; 1993. 224 с.
8. Попов В.М., Лебедев П.Ф. *Анализ сложных гидравлических схем рудничного водоотлива*. М.: Недра; 1978.
9. Долганов А.В. Влияние износа элементов проточной части шахтных насосов ЦНС(К) 300-360 на режимы их работы. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2012;(27-28):110–113.
Dolganov A.V. Effect of wear of elements of flow parts of mine pumps CNS (K) 300-360 on conditions of their operation. *Izvestiya of the Ural State Mining University*. 2012;(27-28):110–113. (In Russ.)
10. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):406–415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>
Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):406–415. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>

11. Šavar M., Kozmar H., Sutlović I. Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming. *Desalination*. 2009;249(2):654–659. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.018>
12. Pei J., Wang W., Yuan S., Zhang J. Optimization on the impeller of a low-specific-speed centrifugal pump for hydraulic performance improvement. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2016;29(5):992–1002. <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0519.069>
13. Shojaeefard M.H., Tahani M., Khalkhali A., Ehghaghi M.B., Fallah H., Beglari M. A parametric study for improving the centrifugal pump impeller for use in viscous fluid pumping. *Heat and Mass Transfer*. 2013;49(2):197–206. <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1074-y>
14. Рахутин М.Г., Занг К.К., Кривенко А.Е., Чан В.Х. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора. *Записки Горного института*. 2023;261:374–383. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16193> (дата обращения: 12.02.2024).
Rakhutin M.G., Giang K.Q., Krivenko A.E., Tran V.H. Evaluation of the influence of the hydraulic fluid temperature on power loss of the mining hydraulic excavator. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:374–383. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16193> (accessed: 12.02.2024).
15. Занг Куок Кхань, Кривенко А.Е., Пудов Е.Ю., Кузин Е.Г. Разработка модели оценки эффективности системы охлаждения рабочей жидкости гидравлического карьерного экскаватора. *Горный журнал*. 2021;(12):64–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.12.12>
Khanh G.Q., Krivenko A.E., Pudov E.Yu., Kuzin E.G. Performance evaluation model for power fluid cooling system of hydraulic excavators. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(12):64–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.12.12>
16. Khoreshok A., Kantovich L., Kuznetsov V., Preis E., Kuziev D. The results of cutting disks testing for rock destruction. *E3S Web of Conferences*. 2017;15:03004. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20171503004>
17. Keropyan A.M., Kuziev D.A., Krivenko A.E. Process research of wheel-rail mining machines traction. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Springer, Cham.; 2020, pp. 703–709. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_75
18. Muzik J., Seidlova A., Kudelcikova M., Kongar-Syuryun C., Mihalik J. Flood hazard calculation by using a digital terrain model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;906(1):012067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012067>
19. Соловьев С.В., Кузиев Д.А. Исследование жестконых параметров привода тягового механизма драглайна эш-10/70. *Уголь*. 2017;(1):37–38.
Soloviev S.V., Kuziev D.A. Dragline ESH-10/70 linkage stiffness parameters study. *Ugol'*. 2017;(1):37–38. (In Russ.)
20. Keropyan A.M. Application of non-contact technologies for measuring roughness of interacting surfaces when monitoring friction coefficient. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):2004–2008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.018>
21. Севагин С.В., Вержанский А.П. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5):35–44. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_35
Sevagin S.V., Verzhansky A.P. Quality control in manufacture of hydraulic cylinder rods for load-haul-dumpers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5):35–44. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_35
22. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика*. М.: Физматлит; 2010. 536 с.

Информация об авторах

Зотов Василий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8575-2970>, e-mail: zotov@misis.ru

Мнацакян Виктория Умедовна – доктор технических наук, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9276-7599>; e-mail: artvik@bk.ru

Базлин Максим Михайлович – аспирант кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0002-1136-5868>; e-mail: maxim_bazlin@mail.ru

Лакшинский Виктор Сергеевич – аспирант кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-6839-0022>; e-mail: lvs@yanzv.com

Дятлова Екатерина Валерьевна – студент кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: lopushnyack.c@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.03.2024

Поступила после рецензирования: 23.03.2024

Принята к публикации: 30.03.2024

Information about the authors

Vasily V. Zotov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8575-2970>, e-mail: zotov@misis.ru

Victoria U. Mnatsakanyan – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9276-7599>; e-mail: artvik@bk.ru

Maxim M. Bazlin – Postgraduate Student, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0002-1136-5868>; e-mail: maxim_bazlin@mail.ru

Viktor S. Lakshinsky – Postgraduate Student, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-6839-0022>; e-mail: lvs@yanzv.com

Ekaterina V. Dyatlova – Student, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: lopushnyack.c@yandex.ru

Article info

Received: 01.03.2024

Revised: 23.03.2024

Accepted: 30.03.2024