

УДК 622.24.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/3546
Шифр специальности ВАК: 2.8.1
Научная статья

Исследование объемного упрочнения породоразрушающих элементов шарошечного долота посредством криогенной обработки

В.В. Нескоромных, И.Р. Белозеров, А.Е. Головченко✉

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉ antong77@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Шарошечные долота – породоразрушающий инструмент, широко используемый в практике геологоразведочных работ, при разработке месторождений полезных ископаемых буровзрывным способом, строительстве сложных инженерных сооружений. В последние десятилетия идет работа по улучшению конструкции и технологии изготовления шарошечных долот для повышения их долговечности. Однако причины выхода из строя остаются прежними. В 80 % случаев отказа шарошечного долота причиной является разрушение подшипниковых опор ввиду тяжёлых условий эксплуатации и больших осевых и динамических нагрузок. Проведение периодического технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов может снизить частоту отказов, но не решит проблему полностью, так как другие части долота, главным образом вооружение, также могут находиться в критическом состоянии. Комплексный подход к техническому обслуживанию долот, включающий помимо ремонта подшипниковых узлов работы по восстановлению прочности породоразрушающих элементов, является обоснованным. Одним из наиболее эффективных и технологически просто реализуемых способов объемного упрочнения породоразрушающих элементов долота, не требующих специализированного оборудования, является их криогенная обработка. **Цель:** определение положительного влияния применения криогенной обработки шарошечных долот на промежуточном техническом обслуживании или восстановительном ремонте изношенных шарошечных долот на ресурс инструмента. **Объект:** усталостное разрушение и методы объемного упрочнения твердосплавных породоразрушающих элементов шарошечных долот. **Методы:** аналитическое исследование процесса снижения прочности материала твердосплавных породоразрушающих элементов шарошечных долот, причин выхода из строя шарошечных долот, постановка и описание эксперимента по объемному упрочнению деталей шарошечного долота кратковременной криогенной обработкой. **Результаты.** Доказана близость средних значений проходки шарошечных долот до выработки ресурса по причине отказа подшипникового узла и износа породоразрушающих элементов, обуславливающая необходимость комплексного подхода к ремонту шарошечных долот. Описан эффект применения криогенной обработки твердых сплавов, заключающийся в рассредоточении полей напряжений и создании равномерного объемного напряжённого состояния сжатия.

Ключевые слова: бурение, долото, упрочнение, криогенная обработка, эксперимент

Для цитирования: Нескоромных В.В., Белозеров И.Р., Головченко А.Е. Исследование объемного упрочнения породоразрушающих элементов шарошечного долота посредством криогенной обработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 163–170. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/3546

UDC 622.24.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/3546
Scientific paper

Volumetric hardening of rock-breaking elements of a ball chisel by cryogenic treatment

V.V. Neskromnykh, I.R. Belozarov, A.E. Golovchenko✉

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ antong77@yandex.ru

Abstract. Relevance. Roller bits are a rock-breaking tool widely used in geological exploration, in development of mineral deposits using drilling and blasting methods, and in construction of complex engineering structures. In recent decades, work has been underway to improve the design and manufacturing technology of roller chisels to increase their durability. However, the reasons for the failure remain the same. In 80% of the cases the roller bit failure, the cause is the destruction of the bearing supports, due to severe operating conditions and large axial and dynamic loads. Carrying out periodic maintenance and repair of bearing assemblies can reduce the failure rate, but will not solve the problem completely, since other parts of the bit, mainly the cutters may also be in critical condition. It seems reasonable to take an integrated approach to the maintenance of chisels, including, in addition to repairing bearing assemblies, work to restore the strength of rock-breaking elements. One of the most effective and technologically simple methods of volumetric hardening of rock-breaking elements of a chisel that do not require specialized equipment is their cryogenic treatment. **Relevance.** To determine the positive effect of the use of cryogenic treatment of roller bits on intermediate maintenance or repair of worn-out roller bits. **Object.** Fatigue destruction of carbide rock-destroying elements of ball bits. **Methods.** Fatigue failure and methods of volumetric hardening of tungsten carbide rock-breaking elements of roller bits. **Results.** The proximity of the average values of the penetration of the roller bits before the resource is exhausted due to the failure of the bearing assembly and wear of the rock-breaking elements, which necessitates an integrated approach to the repair of roller bits. The paper describes the effect of cryogenic treatment of hard alloys on the tool life, which consists in the dispersion of stress fields and the creation of a uniform volumetric stress state of compression.

Keywords: drilling, chisel, hardening, cryogenic treatment, experiment

For citation: Neskoromnykh V.V., Belozerov I.R., Golovchenko A.E. Volumetric hardening of rock-breaking elements of a ball chisel by cryogenic treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 163–170. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/3546

Введение

Буровые работы являются неотъемлемой частью геологоразведочного и нефтегазового производства, позволяют получить исчерпывающую информацию о морфологии рудных тел, физико-механических свойствах горных пород, их минералогическом составе. Объем производимых буровых работ ежегодно возрастает – в ретроспективе последних пяти лет рост составил более 20 % при прогнозе дальнейшего роста в ближайшие три года порядка 3 % ежегодно.

Одним из основных способов бурения является шарошечный. В частности, при разработке месторождений полезных ископаемых с применением буровзрывных работ на объем шарошечного бурения приходится порядка 85 % от общего объема всех производимых буровых работ [1]. Также шарошечный породоразрушающий инструмент широко применяется для бурения глубоких скважин в нефтяной и газовой промышленности, на угольных разрезах, при строительстве сложных инженерных сооружений, мостов, тоннелей, шахт и других объектов [2–4].

Условия эксплуатации шарошечных долот в сложных условиях, например при продувке скважин сжатым воздухом, определяют низкий ресурс данного типа породоразрушающего инструмента. Высокие значения осевого усилия, конструктивные особенности, реализуемый механизм разрушения горных пород негативно влияют на долговечность инструмента. Также на общем ресурсе шарошечных долот негативно сказывается несбалансированность ресурса отдельных узлов и деталей конструкции.

В последние десятилетия ведется трудоемкая работа по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента, в частности, шарошечных долот, о чем свидетельствует большое количество научных статей и патентов в данной области [5–8]. Наряду с улучшением конструкции шарошечных долот научное сообщество проявляет интерес к улучшению технологии изготовления и эксплуатации породоразрушающего инструмента, направленных на увеличение ресурса буровых шарошечных долот. Как следствие, за последние десятилетия показатели ресурса шарошечных долот многократно выросли и на сегодняшний день исчисляются сотнями метров на одно долото. Однако причины выхода из строя, влияющие на долговечность, остаются прежними.

В 80 % случаев причиной отказа шарошечного долота является разрушение одной из подшипниковых опор шарошек [9–12]. Причина отказа шарошечного долота в результате разрушения подшипникового узла объясняется тяжёлыми условиями эксплуатации и большими осевыми и динамическими нагрузками. Первоочередная причина отказа подшипникового узла при продувке заключается в сухом трении тел качения и, как следствие, преждевременном износе вращающихся поверхностей, увеличении зазоров, что приводит к заклиниванию опоры.

Снижения частоты отказов шарошечных долот из-за разрушения подшипникового узла можно достичь за счет проведения периодического технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов шарошечного долота. Однако продление срока службы подшипникового узла не позволит эф-

фективно повысить долговечность шарошечного долота в целом, так как техническое состояние шарошек и твердосплавного вооружения может находиться в критическом состоянии, близком к разрушению вследствие усталости материала [13–20].

Усталостное разрушение твердосплавных породоразрушающих элементов шарошечных долот

В процессе работы шарошечного долота его вооружение испытывает значительные циклически прикладываемые динамические нагрузки, которые возникают при перекатывании шарошки с зубка на зубок в процессе бурения под действием осевой нагрузки и вращения. Вследствие динамических циклически повторяющихся нагрузок материал вставок подвергается знакопеременным напряжениям от высоких критических до нулевых. Циклически прикладываемые динамические нагрузки приводят к деформации сжатия и разгрузки до состояния материала без нагрузки [21–24].

Количество циклов нагружения, которые испытывает каждый индентор за час работы шарошечного долота при определенных параметрах бурения, можно определить по формуле, которая также применима для определения ресурса твердосплавного вооружения шарошечного долота:

$$N_{\text{час}} = \frac{360 \cdot n_{\text{вр}} \cdot D_1}{D_2}.$$

В результате циклично повторяющихся нагрузок поверхность твердосплавного вооружения претерпевает деформацию, в зоне которой возникают микротрещины. Под действием продолжающихся циклических нагрузок микротрещины продвигаются вглубь индентора, что впоследствии приводит к его раскалыванию и разрушению или к выпадению в результате ослабления посадочного места.

Наступление усталостного разрушения индентора зависит от количества циклов N приложенной нагрузки σ . Зависимость наступления усталостного разрушения от числа циклов и приложенной нагрузки описывается диаграммой Веллера (кривая 1, рис. 1). Диаграмма Веллера наглядно демонстрирует, что при некотором значении σ число циклов N стремится к бесконечности. Максимальное значение напряжения, при котором образец способен испытывать бесконечное число циклов не разрушаясь, принято считать пределом выносливости.

На рис. 1 показаны графики, отражающие процесс снижения прочности материала породоразрушающих элементов шарошечного долота и возможные методы продления его срока службы.

Например, долото отработало определенный интервал длительностью T (рис. 1). В этот момент долото вышло из строя из-за изнашивания опоры

качения шарошек. Замена опоры качения шарошек позволила восстановить долото, но в то же время вооружение шарошек получило существенное число знакопеременных нагрузок и деформаций и породоразрушающие вставки могут находиться в состоянии предразрушения. Если в этот момент не производить восстановления и вооружения долота, после возобновления бурения вооружение придет в негодность и выполненные работы по восстановлению опоры долота будут не востребованы.

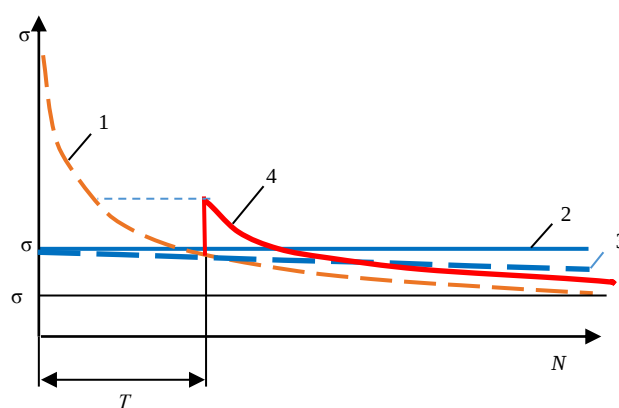


Рис. 1. Графики, отражающие процесс снижения прочности материала вооружения шарошечного долота: 1 – типичная кривая снижения предельного значения прочности материала от числа циклов нагружения N (диаграмма Веллера); 2 – линия напряжений в материале вставки при условии, что при бурении будет повышаться осевая нагрузка по мере появления площадки притупления вставки; 3 – напряжения в материале вставки при условии, что осевая нагрузка на инструмент постоянна; 4 – кривая прочности материала вставки после скачка прочности в момент обработки вооружения долота в жидком азоте

Fig. 1. Graphs showing reduction of the strength of the material weapons of roller bit: 1 – typical curve of the lower limit values of the strength on the number of loading cycles N (Weller diagram); 2 – line of stresses in the insert material provided that during the drilling the axial load capacity will increase with the emergence of platforms and the blunting of the insert; 3 – stresses in the insert material under the condition that the axial load on the tool is constant; 4 – curve of the insert material strength after the strength jump at the time of handling weapons bits in liquid nitrogen

Одним из наиболее эффективных и технологически просто реализуемых способов объемного упрочнения породоразрушающих элементов долота является криогенная обработка.

Ранее проводились исследования криогенной обработки бурового инструмента [2, 3]. В приве-

денных работах описаны теория и опыт упрочнения нового, не подверженного усталостному разрушению, материала буровых коронок и долот. Работ по повышению прочностных характеристик материала (стали и твердого сплава) ранее не проводилось, и, учитывая нарастающее число трещин и дислокаций при процессах усталостного разрушения, представляется интересным и важным установление связи криогенной обработки и процессов восстановления прочности материалов, испытывавших усталостное разрушающее воздействие.

Обработка в жидком азоте после восстановления опор качения шарошек позволяет повысить прочность вооружения долота (кривая 4) и продлить срок службы восстановленного долота. Линия 2 и 3 показывают возможные варианты возникающих в материале вставок напряжений при повышении нагрузки на долото по мере изнашивания вставок (рост площадки притупления, требующий повысить осевую нагрузку для сохранения прежнего уровня разрушающих породу напряжений). Линия 3 на графике показывает снижение напряжений в материале вставок, поскольку по мере роста площадки притупления (площади контакта вставки с породой) осевая нагрузка не меняется.

Обобщенные данные о причинах выхода из строя шарошечных долот на предприятии ООО «Соврудник» приведены в таблице.

В таблице представлены усреднённые значения проходки шарошечных долот и причины их отказа с привязкой к определенному буровому станку.

Анализ наработки шарошечных долот на объектах компании показывает, что частота выхода из строя долота по причине отказа подшипникового узла в среднем в 2,1 раза превышает частоту выхода из строя долота по причине износа режущих элементов. Однако сопоставление средних значений проходки долот до выработки ресурса по причине отказа подшипникового узла и износа породоразрушающих элементов показывает превышение второго типа отказа на 10 %.

Данные соотношения, вероятнее всего, связаны с превышением рекомендованных значений осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент, которые зачастую обосновываются желанием повышения механической скорости бурения и, как следствие, производительности процесса бурения, что приводит к преждевременному выходу из строя шарошечных долот по причине отказа подшипникового узла.

Сопоставимые значения проходки долот до выработки ресурса по причине отказа подшипникового узла и износа режущих элементов показывают, что ресурс подшипниковых узлов близок к ресурсу твердосплавного вооружения шарошечного долота и проведение восстановительных работ подшипникового узла, которые на практике отождествляются с исчерпывающим ремонтом породоразрушающего инструмента, не даст ожидаемой эффективности. Повышения долговечности шарошечных долот можно достичь только комплексным решением множества задач, связанных с увеличением ресурса не только подшипникового узла, но и породоразрушающих элементов в виде твердосплавных вставок.

В связи с тем, что предел выносливости подшипникового узла и твердосплавного вооружения шарошечного долота напрямую зависит от величины осевого усилия, которое снизить не представляется возможным из технико-экономических соображений, рациональный путь повышения долговечности конструкции состоит в повышении выносливости наиболее уязвимых элементов.

В настоящее время разработано множество способов повышения долговечности шарошечных долот, связанных с повышением ресурса подшипникового узла и твердосплавного вооружения, которые производят на предэксплуатационном цикле работы бурового инструмента [16–18]. Однако способы повышения долговечности подшипникового узла и твердосплавного вооружения непосредственно во время эксплуатации или в период ремонта мало изучены и не применяются.

Таблица. Причины выхода из строя шарошечных долот на объектах компании

Table. Reasons for the failure of ball bits at the company facilities

№ бурового станка Drilling rig number	Кол-во долот Number of chisels	Количество долот по причине отказа износа Number of chisels due to wear failure of the		Средняя проходка до отказа по причине отказа износа Average excavation to failure due to wear failure of the	
		подшипникового узла bearing assembly	режущих элементов cutting elements	подшипникового узла bearing assembly	режущих элементов cutting elements
СБШ № 1 SBSh no. 1	12	10	2	1279	1817
СБШ № 2 SBSh no. 2	9	7	2	1531	2026
СБШ № 3 SBSh no. 3	9	5	4	2358	1709
СБШ № 4 SBSh no. 4	14	8	6	1342	1020
СБШ № 5 SBSh no. 5	8	5	3	2160	2963

Одним из перспективных направлений является метод объемного упрочнения при кратковременной криогенной обработке. Повышение долговечности бурового инструмента на предэксплуатационном цикле методами криогенной обработки детально описано в [20]. Исследования, описанные в работе, подтверждают положительное влияние данного метода на увеличение ресурса инструмента. В описании эксперимента по криогенной обработке шарошечных долот на предэксплуатационном цикле, проведенного специалистами Томского политехнического института совместно с ПГО «Томскнефтегазгеология», представлены положительные результаты с повышением средней проходки на долото на 40 % и увеличением средней механической скорости бурения до 30 %.

Целью представленного исследования, проведенного на базе кафедры технологии и техники института цветных металлов Сибирского федерального университета, является определение положительного влияния применения криогенной обработки шарошечных долот на промежуточном этапе технического обслуживания или при восстановительном ремонте изношенных шарошечных долот на ресурс инструмента.

Методика проведения эксперимента по объемному упрочнению деталей шарошечного долота кратковременной криогенной обработкой

Экспериментальные исследования проводились по предварительно разработанной методике.

Для изучения влияния криогенной обработки на ресурс инструмента в качестве образца выбран породоразрушающий элемент шарошечного долота 215 ОК-ПВ, выведенного из эксплуатации по причине заклинивания одного из подшипниковых узлов. Для валидации результатов эксперимента по изучению влияния криогенной обработки на твердосплавный индентор структура индентора зафиксирована до и после криогенной обработки.

Поверхность подготовленного образца подвергли пробоподготовке, которая включала в себя шлифовку и полировку на лабораторном оборудовании PLATO FS с последующим травлением.

Перед проведением криогенной обработки поверхность образца была изучена на микроскопе ZEISS Observer.A1m с помощью программного обеспечения Suifams 800. Состояние поверхности твердосплавного элемента представлено на рис. 2.



Рис. 2. Твердосплавное вооружение шарошечного долота 215 ОК-ПВ до криогенной обработки

Fig. 2. Carbide armament of the 215 OK-PV ball chisel before cryogenic treatment

После первичного изучения образец был подвержен тридцатиминутной криогенной обработке путем погружения образца в сосуд с жидким азотом. После чего образец достали и дали нагреться до комнатной температуры +20 °С без намеренного нагрева.

Для дальнейшего изучения образца под микроскопом поверхность обезжирили.

Результаты экспериментального исследования объемного упрочнения деталей шарошечного долота

Поверхность образца после криогенной обработки представлена на рис. 3.



Рис. 3. Твердосплавное вооружение шарошечного долота 215 ОК-ПВ после криогенной обработки

Fig. 3. Carbide armament of the 215 OK-PV ball chisel after cryogenic treatment

Графическое сопоставление микроструктуры среза исследуемого породоразрушающего элемента до криогенной обработки (рис. 2) и после неё (рис. 3) позволяет судить о существенном изменении структуры твердого сплава. Например, визуально можно отметить, что исчезли многочисленные дислокации и материал стал отличаться высокой степенью однородности.

Изменения в структуре твердого сплава, устранение микротрещин и дислокаций происходят вследствие термического удара в момент резкого снижения температуры материала. При выравнивании температуры криогенной среды и образца в короткий промежуток времени совершается значительный объем работы, способствующей перераспределению полей напряжения в материале, формирующей равномерное объёмное напряжённое состояние сжатия, происходит выравнивание градиента концентрации напряжений. Таким образом, в локальных зонах концентрации напряжений, в том числе формирующих зоны предразрушения твердого сплава, и в ненарушенных зонах материала породоразрушающего элемента после криогенной обработки устанавливается некоторое среднее значение напряжений, а значит, в целом происходит повышение прочности материала.

Выводы

1. Ремонт шарошечных долот необходимо проводить комплексно, и помимо ремонта подшипниковых узлов требуются работы по восстановлению прочности вооружения долот, испытывавших

усталостное воздействие вследствие циклических динамических нагрузок. В противном случае возможен быстрый выход из строя восстановленных долот вследствие разрушения его вооружения, так как исследованием доказана близость средних значений проходки шарошечных долот до выработки ресурса по причине отказа подшипникового узла и износа породоразрушающих элементов.

2. Объёмное упрочнение материала породоразрушающих элементов, испытывавшего значительные динамические циклически повторяющиеся нагрузки, можно проводить методом криогенной обработки, показавшим высокий уровень упрочнения материала, не испытывавшего усталостного разрушающего воздействия.
3. Криогенная обработка твёрдых сплавов, определяющая термический удар и совершение значительного объема работы, способствует расщеплению полей напряжений, устранению дислокаций, вызванных усталостным силовым воздействием, и созданию равномерного объёмного напряжённого состояния сжатия.
4. Криогенная обработка породоразрушающих элементов как часть комплекса восстановительного ремонта шарошечных долот не требует наличия специализированного оборудования, может проводиться непосредственно на участке производства работ и продлевать срок службы вооружения породоразрушающего инструмента после комплексного восстановления бурового инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Белозеров И.Р., Бовин К.А. Экономический критерий эффективности восстановительных мероприятий изношенных буровых долот // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 1. – С. 27–32.
2. Кремлев В.И. Повышение долговечности буровых шарошечных долот на основе совершенствования технологии сборки и упрочнения шарошек с твердосплавными зубками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2009. – 19 с.
3. Рябчиков С.Я. Объёмное упрочнение твердосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента с целью повышения его эксплуатационных показателей: автореф. дис. ... д-р. техн. наук. – Томск, 2002. – 42 с.
4. Effects of drilling parameters on drill bit wear of ASTM A36 steel / C. Makee, U. Kitkamthorn, P. Mitsomwang, R. Borrisutthekul // Journal of Applied Research on Science and Technology. – 2025. – Vol. 24. – № 1. – P. 1–7.
5. Gao Y., Wang Y., Chen Z. The effect of cryogenic treatment on microstructure and properties of WC–Co cemented carbides // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – Vol. 34. – P. 12359–12370.
6. Tretyak A.A., Borisov K.A., Grossu A.N. The use of new wear-resistant materials in the development of two-level bits with a balanced resultant moment at the drilling flight // International Science and Technology Conference on Earth Science. – 2019. – Vol. 272. – № 2. – P. 1–7.
7. Slipchuk A., Jakym R. Technological parameters of hole shaping in the cones rolling-cutter row of roller cone bits // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – P. 123–132.
8. Delivering best in class ROP performance by pushing the operational envelope with novel advanced bit designs / M. Armenta, M. Dykstra, J. Muesel, E. Marshall // Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – 2022. – P. 1–12.
9. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 336 с.
10. Нескоромных В.В. Бурение скважин: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2025. – 352 с.
11. Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах: монография. – М.: ИД Академии Естествознания, 2017. – 266 с.
12. Ugurlu O.F., Kumral M. Management of drilling operations in surface mines using reliability analysis and discrete event simulation // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2020. – Vol. 20. – P. 1143–1154.
13. Боярских Г.А., Симисинов Д.И. Ретроспективный анализ исследований и предпосылки обеспечения надежности бурового инструмента // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 7. – С. 58–65.

14. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification) // *Engineering Failure Analysis*. – 2018. – Vol. 90. – P. 554–584.
15. Rashidi B., Hareland G., Nygaard R. Real-time drill bit wear prediction by combining rock energy and drilling strength concepts // *The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. – Abu Dhabi, 2008. – P. 21–24.
16. Попов М.А. Повышение износостойкости шарошечных долот путем нанесения плазменного безвакуумного тонкопленочного покрытия // *Металлообработка*. – 2019. – Т. 113. – № 5. – С. 34–41.
17. Результаты стендовых испытаний опытных долот, оснащенных композитными наплавленными слоями / В.Н. Гадалов, В.М. Бродский, Е.А. Филатов, А.В. Филонович // *Главный механик*. – 2020. – № 8. – С. 52–56.
18. Белокозовкин С.А., Ибатуллин И.Д. Исследование процесса формирования наноструктурированных серебряно-алмазных покрытий // *Сфера. Нефть и газ*. – 2020. – Т. 75. – № 1. – С. 40–44.
19. New roller cone bit technology for geothermal application significantly increases on-bottom drilling hours / S. Orazzini, R. Kasirin, G. Ferrari, A. Bertini // *Geothermal Resources Council Transactions*. – 2011. – Vol. 35. – P. 215–224.
20. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Власюк В.И. Повышение работоспособности породоразрушающего инструмента методами криогенной обработки и радиационного облучения. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 92 с.
21. Sue A., Sreshta H., Qiu B.H. Improved hardfacing for drill bits and drilling tools // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20. – № 1. – P. 372–377.
22. Курганова Ю.А., Панина К.С., Бешенков П.С. Анализ возможности повышения свойств материала ВК15 для бурового инструмента // *Записки горного института*. – 2018. – Т. 233. – С. 518–524.
23. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/CO): a study of wear parts / P. Katiyar, P. Singh, R.S. Parihar, A. Kumar // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 54. – P. 27–38.
24. Gobber F.S., Fracchia E., Rosso M. Wear characterization of cemented carbide multipoint cutting tool machining AISI 4140 at high cutting speed: criteria for materials selection // *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, 2019. – P. 711–718.

Информация об авторах

Вячеслав Васильевич Нескоромных, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. sovair@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-0779>

Илья Романович Белозеров, аспирант кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. belozerovir@mail.ru

Антон Евгеньевич Головченко, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. antong77@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7069-6483>

Поступила в редакцию: 25.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.11.2024

Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. Neskornyy V.V., Belozero I.R., Bovin K.A. Economic criterion for the effectiveness of restoration measures of worn drill bits. *Mining equipment and electromechanics*, 2021, no. 1, pp. 27–32. (In Russ.)
2. Kremlev V.I. *Increasing the durability of drilling ball bits based on improving the technology of assembly and hardening of balls with carbide teeth*. Cand. Diss. Abstract. Samara, 2009. 19 p. (In Russ.)
3. Ryabchikov S.Ya. *Volumetric hardening of carbide and diamond rock-breaking tools in order to improve its performance*. Dr. Diss. Abstract. Tomsk, 2002. 42 p. (In Russ.)
4. Makee C., Kitkamthorn U., Mitsomwang P., Borrisutthekul R. Effects of drilling parameters on drill bit wear of ASTM A36 steel. *Journal of Applied Research on Science and Technology*, 2025, vol. 24, no 1, pp. 1–7.
5. Gao Y., Wang Y., Chen Z. The effect of cryogenic treatment on microstructure and properties of WC–Co cemented carbides. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 34, pp. 12359–12370.
6. Tretyak A.A., Borisov K.A., Grossu A.N. The use of new wear-resistant materials in the development of two-level bits with a balanced resultant moment at the drilling flight. *International Science and Technology Conference on Earth Science*, 2019, vol. 272, no. 2, pp. 1–7.
7. Slipchuk A., Jakym R. Technological parameters of hole shaping in the cones rolling-cutter row of roller cone bits. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 123–132.
8. Armenta M., Dykstra M., Muesel J., Marshall E., Yango T., Adeleye O., Nagaraj M., Nasief M. Delivering best in class ROP performance by pushing the operational envelope with novel advanced bit designs. *Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2022, pp. 1–12.
9. Neskornyy V.V. *Destruction of rocks during well drilling*. Moscow, INFRA-M Publ., 2023. 336 p. (In Russ.)
10. Neskornyy V.V. *Drilling wells*. Moscow, INFRA-M Publ., 2025. 352 p. (In Russ.)
11. Shigin A.O., Gilev A.V., Shigina A.A. *Methodology of design of adaptive rotary-feeding bodies of drilling rigs and technologies of their application in complex-structured rock massifs: monograph*. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2017. 266 p. (In Russ.)
12. Ugurlu O.F., Kumral M. Management of drilling operations in surface mines using reliability analysis and discrete event simulation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2020, vol. 20, pp. 1143–1154.

13. Boyarskikh G.A., Simisinov D.I. Retrospective analysis of research and prerequisites for ensuring the reliability of drilling tools. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2009, no. 7, pp. 58–65. (In Russ.)
14. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Engineering Failure Analysis*, 2018, vol. 90, pp. 554–584.
15. Rashidi B., Hareland G., Nygaard R. Real-time drill bit wear prediction by combining rock energy and drilling strength concepts. *The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Abu Dhabi, 2008, pp. 21–24.
16. Popov M.A. Increasing the wear resistance of ball bits by applying a plasma vacuum-free thin-film coating. *Metallrobootka*, 2019. vol. 113, no. 5, pp. 34–41. (In Russ.)
17. Gadlov V.N., Brodskiy V.M., Filatov E.A., Filonovich A.V. Results of bench tests of experimental bits equipped with composite deposited layers. *Glavny mekhanik*, 2020, no. 8, pp. 52–56. (In Russ.)
18. Belokorovkin S.A., Ibatullin I.D. Investigation of the formation process of nanostructured silver-diamond coatings. *Sfera. Neft i gaz*, 2020, vol. 75, no. 1, pp. 40–44. (In Russ.)
19. Orazzini S., Kasirin R., Ferrari G., Bertini A. New roller cone bit technology for geothermal application significantly increases on-bottom drilling hours. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2011, vol. 35, pp. 215–224.
20. Ryabchikov S.Ya., Mamontov A.P., Vlasyuk V.I. *Improving the efficiency of rock-destroying tools by cryogenic treatment and radiation irradiation*. Moscow, Geoinformmark Publ., 2001. 92 p. (In Russ.)
21. Sue A., Sreshta H., Qiu B.H. Improved hardfacing for drill bits and drilling tools. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 372–377.
22. Kurganova Y.A., Panina K.S., Beshenkov P.S. Analysis of possible enhancement of properties of VK15 material used for drilling tools. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 223, pp. 518–524. (In Russ.)
23. Katiyar P., P Singh., Parihar R.S., Kumar A. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): a study of wear parts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 27–38.
24. Gobber F.S., Fracchia E., Rosso M. Wear characterization of cemented carbide multipoint cutting tool machining AISI 4140 at high cutting speed: criteria for materials selection. *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, 2019. pp. 711–718.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. sovair@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-0779>

Ilya R. Belozerov, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. belozerovir@mail.ru

Anton E. Golovchenko, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. antong77@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7069-6483>

Received: 25.09.2024

Revised: 21.11.2024

Accepted: 14.07.2025