



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-122-126>  
УДК 669.15

Поступила 16.02.2026  
Received 16.02.2026

## ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ И СТРУКТУРЫ ДОЛОТНОЙ СТАЛИ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ ОПОР БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

А. Л. ВАЛЬКО, С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

Приведены результаты исследований опор герметизированных шарошечных буровых долот, изготовленных из стали 19ХГНМА, после эксплуатации в Лебединском ГОК. Приводятся данные по химическому составу, микроструктуре, распределению твердости по сечению цапф опор, которые являются внутренним кольцом роликового подшипника качения. Установлено, что недостаточная эффективная толщина упрочненного слоя и недостаточная твердость слоя на его критической глубине, в которой зарождаются и развиваются усталостные процессы, послужили причинами преждевременному глубинному контактному выкрашиванию цапфы.

**Ключевые слова.** Герметизированные шарошечные буровые долота, химический состав, микроструктура, распределение твердости, глубинное контактное выкрашивание.

**Для цитирования.** Валько, А. Л. Влияние твердости и структуры долотной стали на контактную усталость опор бурового инструмента / А. Л. Валько, С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2026. № 2. С. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-122-126>.

## EFFECT OF HARDNESS AND STRUCTURE OF BIT STEEL ON CONTACT FATIGUE OF DRILLING TOOL BEARINGS

A. L. VAL'KO, S. P. RUDENKO, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of the  
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaja str. E-mail: sprud.47@mail.ru

The results of studies of the supports of sealed roller bits made of 19KhGNMA steel after operation in Lebedinsky GOK are given. Data are provided on the chemical composition, microstructure, and hardness distribution across the cross-section of the bearing journals, which are the inner ring of a rolling roller bearing. It was found that insufficient effective thickness of the strengthened layer and insufficient hardness of the layer at its critical depth, at which fatigue processes originate and develop, were the reasons for premature deep contact chipping of the trunnion.

**Keywords.** Sealed roller drill bits, chemical composition, microstructure, hardness distribution, deep contact chipping.

**For citation.** Val'ko A. L., Rudenko S. P., Sandomirski S. G. Effect of hardness and structure of bit steel on contact fatigue of drilling tool bearings. Foundry production and metallurgy, 2026. no. 2, pp. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-122-126>.

Буровые долота являются основным инструментом, с помощью которого ведется бурение скважин в нефтяной и газовой промышленности на карьерах по добыче угля и руд черных и цветных металлов, а также в строительстве [1]. Буровые долота эксплуатируются в тяжелых условиях, так как предназначены для разрушения горных и почвенных пород, имеющих широкий спектр физико-механических свойств. Безотказность бурового инструмента во многом определена металлургическим качеством и химическим составом применяемых сталей, а также технологией изготовления и упрочнения деталей долот. Шарошечные долота работают при высоком входном крутящем моменте (до 2500 Нм) в условиях существенной динамичности приложения нагрузки (коэффициент динамичности  $K_d = 1,3–1,5$ ), контактные напряжения достигают в опорах качения 4000–5000 МПа [1]. Высокая энергоемкость разрушения горных пород требует подведения к долоту большой мощности (более 50 кВт). Реализация этой мощности происходит через небольшие контактные поверхности, что обуславливает высокую напряженность работы элементов долота.

Одной из самых нагруженных частей буровых долот является опора, на которой вращается шарошка. Опора может быть на подшипниках качения и скольжения, открытой или герметизированной. Она подвергается воздействию высокой статической и динамической нагрузок, скручивающему усилию

и работает в условиях контактно-усталостного, абразивного и ударно-абразивного изнашивания [2], поэтому сталь, используемая для изготовления лапы долота, должна обеспечить высокую прочность и вязкость в сочетании с высокой контактной выносливостью и хорошей износостойкостью.

Многолетние исследования показывают, что работоспособность и безотказность буровых долот определяются не только конструкцией, качеством изготовления деталей и сборки долот, но и качеством материалов, из которых изготовлены детали долот, и их химико-термического упрочнения [3–8].

В настоящее время основным производителем буровых долот и соответственно крупнейшим потребителем долотной стали в России является ОАО «Волгабурмаш». Разработаны технические условия ТУ 14–550–51–2015, которые определяют марки стали и требования к металлургическому качеству горячекатаного проката для изготовления лап и шарошек. Марки и химический состав сталей должны соответствовать данным, приведенным в таблице.

Твердость проката в состоянии поставки должна быть не более 269 НВ (диаметр отпечатка – не менее 3,7 мм) для сталей 14ХНЗМА и 19ХГНМА и не более 241 НВ (диаметр отпечатка – не менее 3,9 мм) для сталей 15НЗМА и 17НЗМА-Ш.

Массовая доля элементов, %

Марка стали	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Сера	Фосфор	Медь
							не более		
14ХНЗМА	0,12–0,16	0,20–0,35	0,40–0,70	1,05–1,35	3,00–3,50	0,10–0,15	0,020	0,020	0,30
15НЗМА	0,11–0,15	0,15–0,30	0,30–0,65	£ 0,30	3,20–3,80	0,20–0,30	0,020	0,020	0,30
17НЗМА-Ш	0,15–0,20	0,17–0,37	0,35–0,65	£ 0,30	3,20–3,80	0,20–0,30	0,015	0,020	0,25
19ХГНМА	0,17–0,22	0,15–0,30	0,60–0,95	0,35–0,65	0,35–0,75	0,20–0,30	0,020	0,020	0,30

**Цель работы** – исследование влияния механических свойств и структуры долотной стали на контактную усталость опор бурового инструмента.

**Методика исследования.** Исследовали образцы опор герметизированных шарошечных долот, изготовленных из цементуемой стали 19ХГНМА после эксплуатации в условиях потребителя. Вырезку образцов выполняли абразивными кругами с подачей охлаждающей жидкости в зону резания. Для исключения влияния поверхностного наклепа на точность определения твердости при малых нагрузках в процессе подготовки образцов применяли тонкое механическое шлифование и полирование с использованием алмазных абразивов разной дисперсности.

Твердость определяли по Виккерсу на разном расстоянии от поверхности образцов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507–4–2009. Испытания при нагрузке 4,903 Н (500 гс) проводили на микротвердомере ПМТ-3М, оснащенный видеокамерой, подключенной к компьютеру. Диагональ восстановленного (после снятия нагрузки и удаления индентора из испытуемого образца) отпечатка  $d$  измеряли с погрешностью  $1 \cdot 10^{-4}$  мм при оптическом увеличении 800.

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы МИМ-8М, НЕОРНОТ 32 при увеличениях от 100 до 400. Аппроксимацию экспериментальных данных выполняли с помощью приложения Microsoft Office Excel.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 показан общий вид двух опор (лап) шарошечных долот типа 250,8 ТКЗ-ПГВУ, изготовленных из стали 19ХГНМА, после эксплуатации в Лебединском ГОК при бурении крепких пород. Опора № 1 (рис. 1, а) проработала 26 ч с общей проходкой 114 пог. м. Видно, что поверхность роликового подшипника качения опоры подвержена контактному выкрашиванию. Установлено, что данный вид повреждения поверхности относится к глубинному контактному выкрашиванию, которое является основным видом предельного состояния высоконапряженных деталей [9]. Опора № 2 (рис. 1, б) без следов контактного выкрашивания проработала 88 ч с общей проходкой ~400 пог. м.

На рис. 2 показано распределение твердости по толщине упрочненного слоя, полученное на образцах, вырезанных из двух опор. Эффективная толщина слоя, определенная для опоры № 1 по методике [10], составляет 1,6 мм до зоны твердостью 530 НВ<sub>0,5</sub> и 0,2 мм до зоны твердостью 750 НВ<sub>0,5</sub>. Для опоры № 2 указанные параметры упрочненного слоя намного выше и составляют 2,1 мм до зоны твердостью 530 НВ<sub>0,5</sub> и 0,7 мм до зоны твердостью 750 НВ<sub>0,5</sub>. Результаты послойного анализа на распределение углерода по толщине цементованного слоя показали одинаковое содержание углерода 0,85–0,80 мас. %

от поверхности до глубины 0,5 мм на обеих опорах. Расстояние же от поверхности по содержанию углерода 0,35 мас.% различается: для опоры № 1 составляет 1,7 мм, для опоры № 2 равно 2,2 мм.



Рис. 1. Общий вид исследованных опор

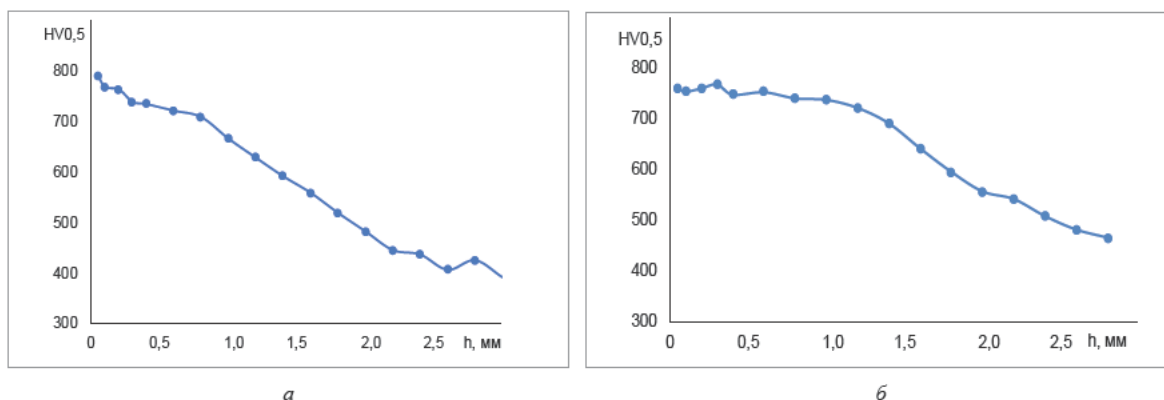


Рис. 2. Распределение твердости HV0,5 по толщине упрочненного слоя  $h$  образцов, вырезанных из опор:  $a$  – № 1;  $b$  – № 2

Таким образом, недостаточная эффективная толщина упрочненного слоя и недостаточная твердость слоя на его критической глубине, в которой зарождаются и развиваются усталостные процессы, послужили причинами преждевременному глубинному контактному выкрашиванию опоры № 1.

Следует отметить, что микроструктура цементованного слоя на глубину 1 мм и сердцевины образцов исследованных опор идентична. На рис. 3 показаны микроструктуры цементованного слоя и сердцевины образца опоры № 1 (травление в 4%-ном растворе азотной кислоты): в цементованном слое (рис. 3,  $a$ ) – мелкоигльчатый мартенсит 3–20 балла (ГОСТ 8233), остаточный аустенит и карбиды 1–20 балла; в сердцевине (рис. 3,  $b$ ) – бейнит и троостит при твердости 30–38 HRC.

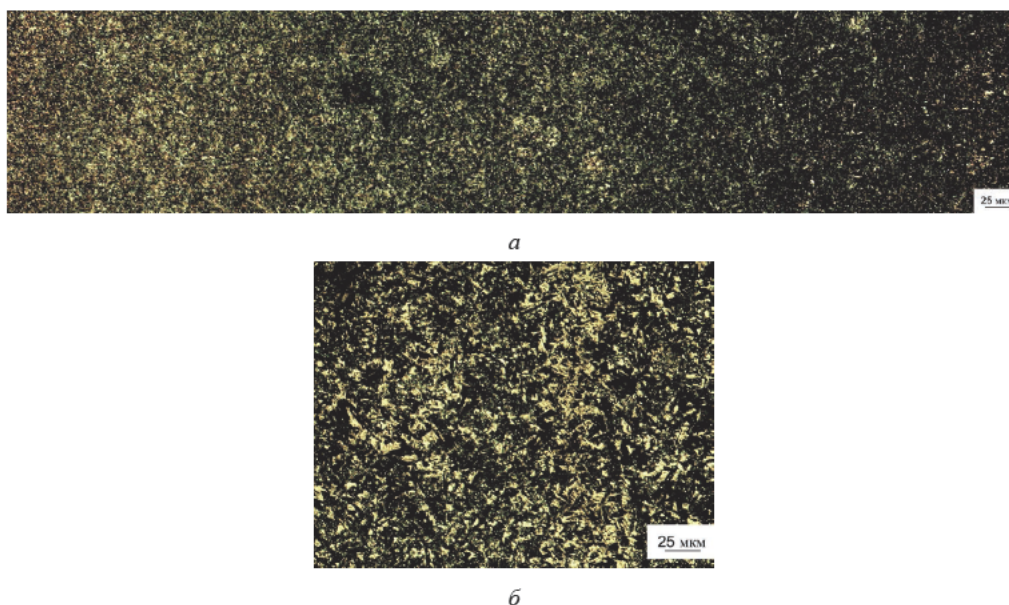


Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя ( $a$ ) и сердцевины ( $b$ ) образца опоры № 1

На рис. 4 показана микроструктура цементованного слоя и сердцевины образца опоры № 2 (травление в реактиве по патенту № 15273): в цементованном слое (рис. 4, а) – мелкоигольчатый мартенсит 3–20 балла (ГОСТ 8233), остаточный аустенит и карбиды 1 балла, действительное зерно № 8–9; в сердцевине (рис. 4, б) – бейнит, троостит, до 10% феррита, зерно № 8, при твердости 30–34 HRC. Травление в реактиве по патенту № 15273 позволило выявить величину зерна в цементованном слое и сердцевине.

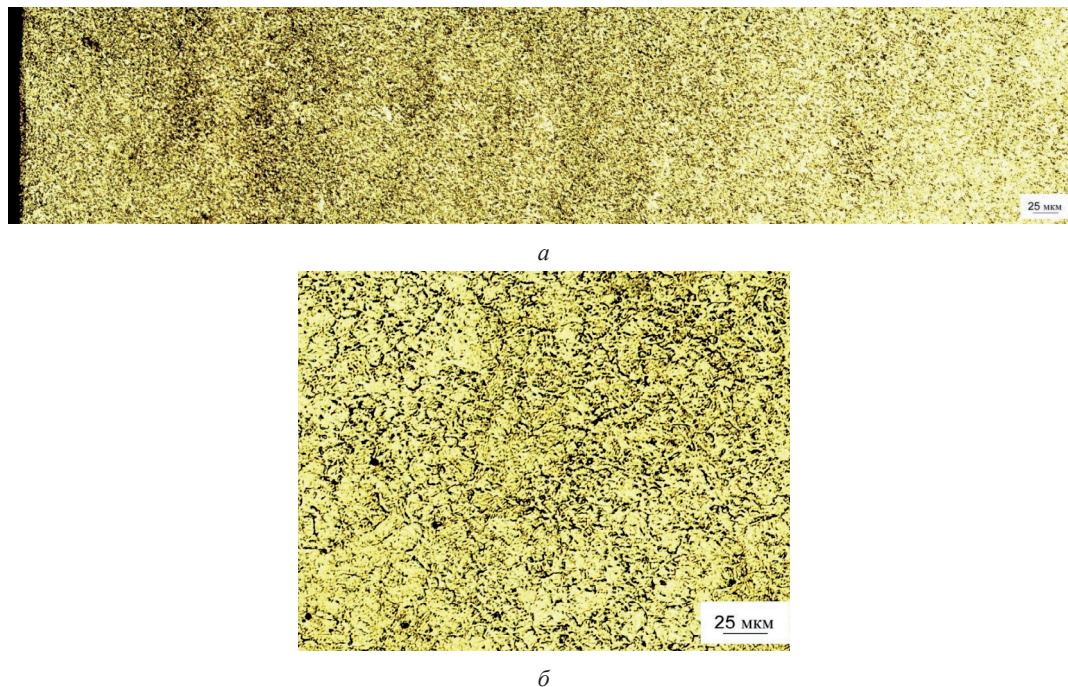


Рис. 4. Микроструктура цементованного слоя (а) и сердцевины (б) образца опоры № 2

### Выводы

Приведены результаты исследований опор герметизированных шарошечных буровых долот, изготовленных из стали 19ХГНМА, после эксплуатации в Лебединском ГОК. Установлено, что причинами преждевременного глубинного контактного выкрашивания поверхности роликового подшипника качения опоры являются недостаточные эффективная толщина упрочненного слоя и величина твердости слоя на его критической глубине, в которой зарождаются и развиваются усталостные процессы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов, А. П. Долотная сталь / А. П. Амосов, А. Г. Ищук, Т. М. Пугачева. – М.: Машиностроение, 2008. – 291 с.
2. Долговечность буровых долот / В. Н. Виноградов [и др.]. – М.: Недра, 1977. – 256 с.
3. Пугачева, Т. М. Исследование сталей, применяемых в буровых долотах диаметром до 150,0 мм / Т. М. Пугачева, А. В. Клименко, А. П. Амосов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. технические науки. – 2009. – № 3. – С. 123–131.
4. Жидовцев, Н. А. Результаты испытания долот из стали электрошлакового переплава / Н. А. Жидовцев, Р. Н. Сейфи, Г. И. Матвеев // Нефтяное хозяйство. – 1966. – № 9. – С. 15–18.
5. Хачатуров, С. С. Повышение работоспособности шарошечных буровых долот путем применения сталей вакуумно-дугового переплава / С. С. Хачатуров, П. П. Евсеев, П. А. Палий // Нефтяное хозяйство. – 1975. – № 4. – С. 15–17.
6. Стойкость буровых долот / под ред. К. Б. Кацова. – Киев: Наукова думка, 1979. – 214 с.
7. Долговечность шарошечных долот / Н. А. Жидовцев [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 266 с.
8. Сусин, А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А. А. Сусин. – Минск: Белорусская наука, 1999. – 175 с.
9. Руденко, С. П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько. Минск: Беларуская навука, 2014. – 126 с.
10. СТБ ISO 18203–2019. Измерение толщины поверхностно упрочненного слоя. – Минск: Госстандарт, 2019. – 12 с.

### REFERENCES

1. Amosov A. P., Ishchuk A. G., Pugacheva T. M. *Dolotnaya stal'* [Chisel steel]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 291 p.
2. Vinogradov V. N. [et al.] *Dolgovечnost' burovuh dolot* [Durability of drill bits]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 256 p.
3. Pugacheva T. M., Klimenko A. V., Amosov A. P. *Issledovanie stalej, primenyayemyh v burovuyh dolotah diametrom do 150,0 mm* [Study of steels used in drill bits with diameters up to 150.0 mm]. *Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. tekhnicheskie nauki = Vestn. Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2009, no. 3, pp. 123–131.

4. **Zhidovcev N.A., Sejfi R.N., Matveev G.I.** Rezul'taty ispytaniya dolot iz stali elektroshlakovogo pereplava [Results of testing bits made of electroslag remelting steel]. *Neft. hoz-vo = Oil. economy*, 1966, no. 9, pp. 15–18.
5. **Khachaturov S.S., Evseev P.P., Paliy P.A.** Povyshenie rabotosposobnosti sharoshechnykh burovyykh dolot putem primeneniya stalej vakuumno-dugovogo pereplava [Increasing the performance of roller-cone drill bits by using vacuum-arc remelting steels]. *Neft. hoz-vo = Oil. economy*, 1975, no. 4, pp. 15–17.
6. **Katsov K.B.** (ed.) *Stojkost' burovyykh dolot* [Durability of drill bits]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1979, 214 p.
7. **Zhidovtsev N.A.** [et al.] *Dolgovechnost' sharoshechnykh dolot* [Durability of roller bits]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 266 p.
8. **Susin A.A.** *Himiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detalej* [Chemical-thermal strengthening of highly stressed parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999, 175 p.
9. **Rudenko S.P., Valko A.L.** *Kontakt'naya ustalost' zubchatykh koles transmissij energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of gear wheels of transmissions of energy-intensive machines]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2014, 126 p.
10. STB ISO 18203–2019. *Izmerenie tolshchiny poverhnostno uprochnennogo sloya* [Measurement of surface-hardened layer thickness]. Minsk, Gosstandart Publ., 2019, 12 p.