

Д. т. н. В. В. Кузин¹ (✉), к. т. н. С. Ю. Фёдоров¹, В. Л. Реутов², В. В. Кощеев²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² ООО «ПК «Ремэлектропромнефть», г. Лысьва, Россия

УДК 666.3:546.281'261]:621.822

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПЯТЫ УПОРНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА В УЗЛЕ ГИДРОЗАЩИТЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Приведены результаты исследований состояния рабочей пяты упорных подшипников из реакционно-спеченной керамики на основе карбида кремния (SiSiC-керамики) после демонтажа из гидрозащиты установки электроцентробежных насосов. На рабочей поверхности пяты выявлены многочисленные эксплуатационные повреждения, имеющие разную природу происхождения при трении. На основе систематизации этих повреждений разработаны рекомендации по усовершенствованию конструкции керамического упорного подшипника.

Ключевые слова: установка электроцентробежных насосов (УЭЦН), керамический подшипник, пята подшипника, SiSiC-керамика, эксплуатационные повреждения, трение.

ВВЕДЕНИЕ

Установки электроцентробежных насосов (УЭЦН), широко применяемые в нефтедобыче, обеспечивают высокую эффективность откачки на поверхность многокомпонентной пластовой жидкости в осложненных условиях [1–3]. Высокие абразивная способность и химическая агрессивность пластовой жидкости, в состав которой входят нефть, вода, высокотвердые частицы породы, свободный и растворенный газ, а также ее склонность к образованию отложений солей и парафинов являются основными причинами внезапных отказов узлов УЭЦН [4–6]. Для повышения эксплуатационной надежности этих установок используют систему планово-предупредительных работ [7]. Однако продолжительная разработка нефтяных месторождений и особенно завершающие этапы эксплуатации скважин усугубляют проблему надежности оборудования и сокращают время его межремонтной эксплуатации [8, 9]. Необходимость решения этой задачи определяет особую актуальность модернизации наиболее проблемных узлов УЭЦН [10, 11].

Анализ условий эксплуатации УЭЦН на разных скважинах, выполненный специалистами ПК «Ремэлектропромнефть», выявил причины недостаточной надежности узла «Гидрозащита». На основе результатов этого анализа сформиро-

вана программа модернизации этого узла, важным пунктом которой являлась замена упорного металлического подшипника на керамический. С использованием керамики на основе карбида кремния изготовили партию инновационных подшипников, прошедших апробацию в реальных условиях эксплуатации. При общем положительном результате проведенной замены были определены недостатки разработанной конструкции керамического подшипника. Для устранения этих недостатков проведено исследование, цель которого сформулирована следующим образом — с использованием выявленных эксплуатационных повреждений рабочей поверхности пяты упорного подшипника из реакционно-спеченного карбида кремния в гидрозащите УЭЦН разработать рекомендации по усовершенствованию подшипника.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели использовали методику, разработанную на основе синтеза методологических подходов к повышению эксплуатационной надежности работы УЭЦН и работоспособности керамических изделий [12, 13]. Изучали состояние рабочих поверхностей пяты упорного подшипника в гидрозащите, входящего в состав погружного оборудования. Насосный агрегат, состоящий из последовательно соединенных электродвигателя 1, гидрозащиты 2 и центробежного насоса 3, опускается в скважину на колонне насосно-компрессорных труб 4 в обсадной трубе 5 (рис. 1, а). Гидрозащита 2 передает вращательное движение от электро-



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

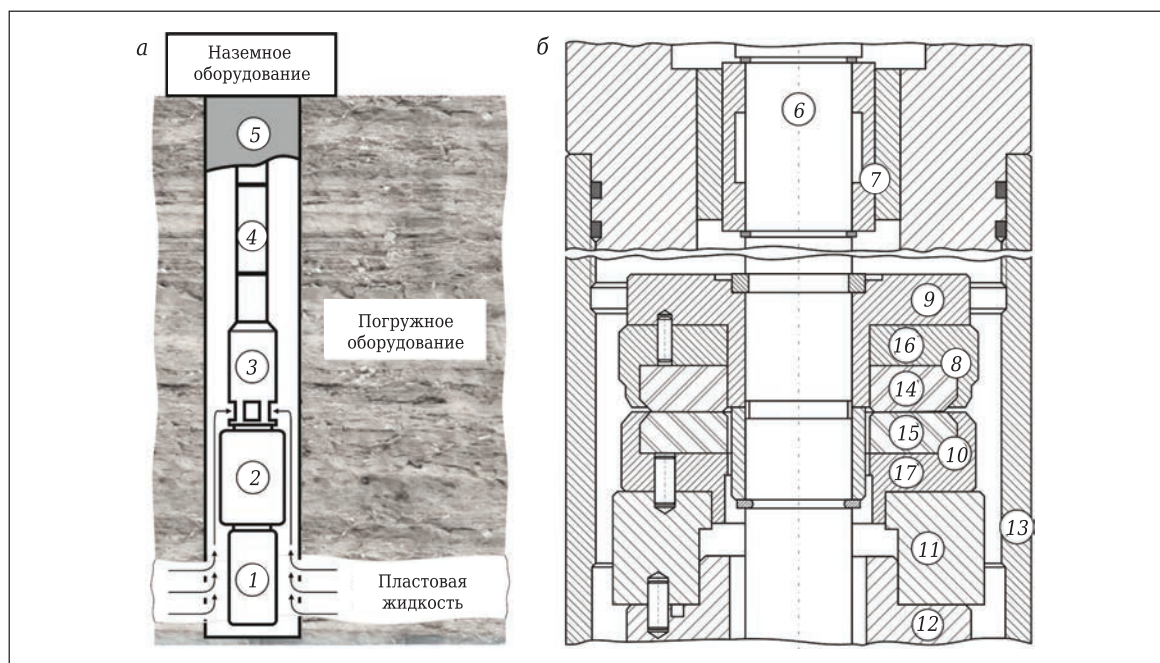


Рис. 1. Принципиальная схема УЭНЦ и конструктивное исполнение упорного подшипника в гидрозащите УЭНЦ

двигателя 1 к центробежному насосу 3, исключая при этом попадание пластовой жидкости во внутреннюю полость электродвигателя. Другая функция гидрозащиты — резервуар для трансформаторного масла, обеспечивающий компенсацию температурного изменения объема масла во внутренней полости электродвигателя. Вал 6 гидрозащиты вращается с частотой 3000 об/мин на четырех радиальных 7 и одном упорном подшипниках скольжения (рис. 1, б). Упорный подшипник состоит из пяты 8, закрепленной на основании 9 и вращающейся совместно с валом 6, а также неподвижного подпятника 10, закрепленного через основание 11 и теплообменник 12 в корпусе 13 гидрозащиты. Пята и подпятник выполнены сборными — вставки кольца 14 и 15 из реакционно-спеченного карбида кремния (SiSiC-керамика) размерами $D \times d \times h = 66 \times 33 \times 10$ мм вклеены и завальцованы в обоймах 16 и 17 из стали 40X13. Вальцовка, препятствующая проворачиванию керамических вставок в обоймах, выполняется по их наружным конусным поверхностям (фаски) на четырех взаимно перпендикулярных участках.

Рабочая поверхность вставки 14 пяты выполнена гладкой, а рабочая поверхность вставки 15 подпятника разделена на восемь сегментов радиальными канавками специальной формы шириной 2 мм и глубиной 0,4 мм. Эти канавки обеспечивают подачу трансформаторного масла в зазор упорного подшипника скольжения и реализацию жидкостного трения этой пары трения. На наружной кромке вставки, образованной пересечением рабочей торцевой поверхности с наружной цилиндрической поверхностью, выполнена фаска размером $1,5 \text{ мм} \times 45^\circ$, а на внутренней кромке,

образованной пересечением рабочей торцевой поверхности с внутренней цилиндрической поверхностью, — фаска размером $0,5 \text{ мм} \times 45^\circ$.

Исследовали состояние рабочей поверхности двадцати трех вставок пяты демонтированных упорных подшипников гидрозащит УЭЦН после выработки межремонтного ресурса (370–400 сут). Для сравнительного анализа использовали исходную (до эксплуатации) пяту упорного подшипника. Приборное обеспечение исследований включало профилограф-профилометр Hommel Tester T8000 и сканирующий электронный микроскоп VEGA3 LMN. Для нанесения токопроводящей пленки углерода на поверхность керамики применяли установку катодного распыления Quorum Q150R ES. Эффективность этой методики доказана результатами, полученными ранее при анализе эксплуатационных повреждений рабочих поверхностей керамических инструментов [14–16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования рабочей поверхности исходной пяты упорного подшипника позволяют констатировать ее практически «идеальное» состояние [17, 18]. Шероховатость рабочей поверхности вставки пяты из SiSiC-керамики не превышает $Ra = 0,01$ мкм; выкрашивания и поры размерами более 15 мкм отсутствуют. На ней присутствуют следы механической обработки в форме концентрических окружностей, созданных доводочным кругом и алмазной пастой. Однако эти следы не следует считать дефектами, способными влиять на эксплуатационные характеристики пяты, так как они не являются областями локального разрушения поверхностного слоя керамики.

На рабочей поверхности исходной вставки пяты обнаружены трещины 1 размерами до 10 мкм на границах зерен, мелкие выкрашивания 2 и поры 3, вскрывшиеся при механической обработке (рис. 2, а). На фаске размером 1,5 мм × 45° на наружной кромке вставки пяты выявлены единичные выкрашивания размерами до 0,1 мм, а на фаске размером 0,5 мм × 45° на внутренней кромке обнаружены многочисленные единичные выкрашивания размерами до 0,2 мм. Структура SiSiC-керамики, использованной для изготовления вставки пяты упорного подшипника, имеет характерный каркасный тип, сформированный плотноупакованными зернами 4 первичного карбида кремния размерами до 30 мкм (рис. 2, б). Пространство вокруг этих зерен заполнено мелкими зернами 5 вторичного карбида кремния размерами до 5 мкм и чистого кремния. На границах зерен обнаружено железо в виде компактных скоплений. Свойства SiSiC-керамики приведены в статье [17].

На рис. 3 показаны общий вид пяты со вставкой из SiSiC-керамики упорного подшипника после 400 сут эксплуатации и микрофотографии отдельных фрагментов ее рабочей поверхности. Эту вставку выбрали в качестве примера для обсуждения результатов исследования из-за наличия критических эксплуатационных повреждений. Видно, что рабочая поверхность вставки пяты имеет весьма дефектный и неоднородный вид; эксплуатационные повреждения представлены в виде задиров, выкрашиваний, трещин, сколов, кольцевых следов трения, рисок, царапин и наплывов от пластической деформации (см. рис. 3, а). Эта совокупность повреждений свидетельствует о весьма сложных трибологических процессах, протекающих в паре трения «пята – подпятник» керамического упорного подшипника в среде трансформаторного масла.

На рабочей поверхности вставки пяты выделяются три кольцевые области, имеющие специфический морфологический рисунок и разную степень поврежденности. Этим областям, являющимся результатом разных условий трения в паре трения пята – подпятник на разных диаметрах вставки пяты, были присвоены индексы А, Б

и В, причем область А примыкает к внутренней кромке вставки пяты, а область В — к внешней кромке. Границы между выделенными областями имеют условный вид, и одна область плавно переходит в другую. Кольцевые области А, Б и В с их специфическими морфологическими рисунками присутствуют на рабочих поверхностях всех исследованных керамических вставок, однако их ширина изменяется в широком диапазоне.

Особого внимания заслуживают многочисленные радиальные трещины 1 двух видов, зародившиеся на внутренней кромке вставки и растущие к ее внешней кромке. К первому виду отнесены короткие трещины, длина которых не превышает ширину кольцевой области А, а ко

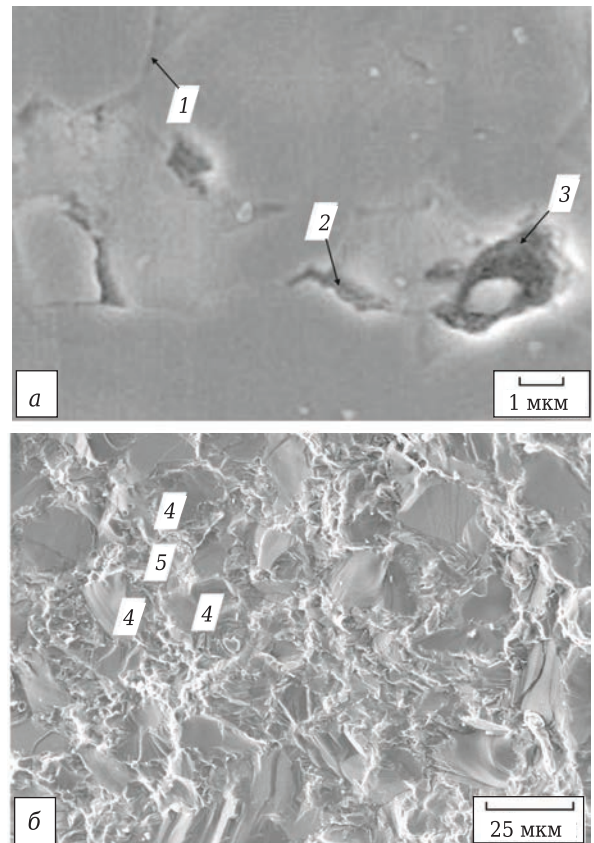


Рис. 2. Дефекты на рабочей поверхности вставки пяты (а) и структура SiSiC-керамики (б)

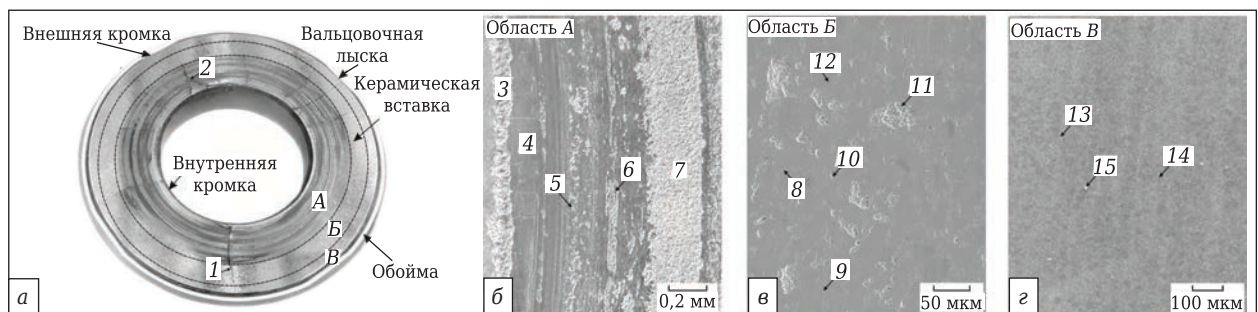


Рис. 3. Эксплуатационные повреждения рабочей поверхности пяты из SiSiC-керамики

второму — длинные трещины, остановившие свой рост в кольцевых областях *Б* и *В*. В отдельных случаях происходит слияние короткой трещины 2 с короткой трещиной в непосредственной близости от внутренней кромки вставки. Наиболее крупные трещины берут начало в секторах, расположенных напротив «вальцовочных лысок» на внешней кромке вставки, которые могут являться концентратором напряжений. В керамике на этих участках под действием сил вальцевания формируются сжимающие напряжения, препятствующие зарождению трещин на внешней кромке вставки пяты, но значительно влияющие на интенсивность и траекторию роста трещин, зародившихся на внутренней кромке.

Установлено, что кольцевая область *А* имеет наибольшее число эксплуатационных повреждений по сравнению с другими областями (*Б* и *В*), имеющими разную природу происхождения при трении (см. рис. 3, б). На внутренней кромке вставки (на месте «бывшей» фаски размером 0,5 мм × 45°), принадлежащей кольцевой области *А*, образуются множественные выкрашивания 3 разных форм и размеров, объединенные в непрерывную цепочку. Цепочка этих выкрашиваний имеет хаотичные по форме границы как с рабочей, так и с внутренней цилиндрической поверхностью керамической вставки. Морфология поверхности этой кольцевой области характеризуется хаотичным сочетанием гладкой поверхности, образованной пластически деформированным слоем 4, и поверхности с развитым рельефом, сформировавшейся в результате разрушения поверхностного слоя керамики. На поверхности пластически деформированного слоя имеются многочисленные наплывы перемещающегося материала и следы пластического выдавливания материала. Более подробно этот процесс проанализирован в публикации [20]. Участки с развитым рельефом имеют локализованную 5, протяженную 6 и кольцевую 7 формы, причем локализованные и протяженные области хаотично распределены на концентрических траекториях. Ширина участков кольцевой формы (задиры) не превышает 0,5 мм.

Морфологию поверхности кольцевой области *Б* формирует тонкий и достаточно ровный пластически деформированный слой материала с единичными наплывами 8 перемещающегося материала и следами трения в виде сегментов концентрических окружностей 9 (см. рис. 3, в). На этой поверхности хаотично располагаются многочисленные вырывы 10 зерен вторичного карбида кремния и участки 11 локального разрушения поверхностного слоя керамики. Размеры этих участков не более 50 мкм, а форма соответствует типичной форме вторичной фазы керамики. Областей разрушений размерами более 50 мкм и глубиной более 5 мкм, образованных в результате вырыва или разрушений зерен первичного карбида кремния, на рабочей поверхности вставки

не обнаружено. Другим характерным дефектом поверхности кольцевой области *Б* являются радиальные трещины, пересекающие или остановившие свой рост в этой области, а также трещины 12, зародившиеся в участках локального разрушения поверхностного слоя керамики.

Состояние поверхности кольцевой области *В* можно определить как бездефектное и созданное в результате прецизионной жидкостной обработки, на которой заметны следы концентрических окружностей 13 от трения (см. рис. 3, г). На этой поверхности, состояние которой можно охарактеризовать как идеальное для высоконагруженной пары трения, присутствуют единичные вырывы 14 фрагментов зерен вторичного карбида кремния, шаржированные твердые частицы 15 и устья остановившихся радиальных трещин. На фаске (1,5 мм × 45°), выполненной на внешней кромке и принадлежащей этой области, выкрашиваний не обнаружено.

Обобщая специфику эксплуатационных повреждений на поверхности трех кольцевых областей, можно отметить, что наиболее неблагоприятные условия трения на керамической вставке пяты формируются в кольцевой области *А*, а самые благоприятные — в кольцевой области *В*. Эти условия трения определяются скоростью скольжения (скорость на внешней кромке вставки в 2 раза больше, чем на внутренней), условиями смазки, в том числе ее наличием (к кольцевой области *А* затруднен ее подвод), силовыми и тепловыми нагрузками (силовые нагрузки больше на внутренней кромке вставки, а тепловые — на внешней).

На основе результатов проведенного исследования разработаны и внедрены рекомендации по усовершенствованию конструкции упорного подшипника из реакционно-спеченного карбида кремния в гидрозащите УЭЦН и технологии его изготовления. Предложено изменить конструкцию обоймы пяты для более эффективного подвода трансформаторного масла к кольцевому участку *А* и обеспечения защиты внутренней цилиндрической поверхности и внутренней кромки керамической вставки пяты от циклических силовых воздействий. Обоснована также необходимость оптимизации усилия при выполнении операции вальцовки керамической вставки в стальной обойме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной методики исследования установлено, что рабочая поверхность вставки пяты имеет весьма дефектный и неоднородный вид. На этой поверхности имеются выкрашивания, трещины, сколы, кольцевые следы трения, риски, царапины и наплывы от пластической деформации, что свидетельствует о сложных трибологических процессах в паре

пяты – подпятник керамического упорного подшипника в среде трансформаторного масла.

На рабочей поверхности вставки пяты выделены три кольцевые области, имеющие разную степень поврежденности, причем кольцевая область, примыкающая к внутренней кромке вставки пяты, является наиболее поврежденной по сравнению с другими областями. Морфология поверхности этой области характеризуется хаотичным сочетанием гладкой поверхности, образованной пластически деформированным слоем,

и поверхности с развитым рельефом, сформировавшейся в результате разрушения поверхностного слоя керамики. На поверхности пластически деформированного слоя имеются наплывы перемещающегося материала, следы пластического выдавливания материала и царапины от абразивных частиц. Систематизация результатов исследований позволила сформулировать рекомендации по усовершенствованию конструкции упорного подшипника из SiSiC-керамики в гидрозащите УЭЦН.

Библиографический список

1. **Ивановский, В. Н.** Анализ работоспособности и надежности центробежных насосов в осложненных условиях эксплуатации / В. Н. Ивановский, В. И. Ивановский, А. А. Дарищев // Нефтепромышленное дело. — 2000. — № 9. — С. 26–30.
2. **Каплан, Л. С.** Эксплуатация осложненных скважин центробежными электронасосами / Л. С. Каплан, А. В. Семенов, Н. Ф. Раздояев. — М.: Недра, 2003. — 89 с.
3. **Персиянцев, М. Н.** Добыча нефти в осложненных условиях / М. Н. Персиянцев. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. — 653 с.
4. **Дарищев, В. И.** Комплекс работ по исследованию и снижению частоты самопроизвольных расчленений (РС-отказов) скважинных насосных установок / В. И. Дарищев, В. Н. Ивановский, Н. Ф. Ивановский. — М.: ВНИИОЭНГ, 2000. — 84 с.
5. **Чернова, К. В.** Эксплуатация глубинных электроцентробежных насосных установок в условиях интенсивного солеотложения / К. В. Чернова, Г. А. Антыкаев, В. В. Шайдаков // Современные наукоемкие технологии. — 2007. — № 10. — С. 28–33.
6. **Шерстюк, А. Н.** Режим работы погружного центробежного насоса для добычи нефти / А. Н. Шерстюк, Ю. Н. Анникова, Т. А. Ермолаева [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2005. — № 8. — С. 18–20.
7. **Дождиков, В. А.** Опыт эксплуатации и ремонт УЭЦН в ТПП «Когалымнефтегаз» / В. А. Дождиков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 1998. — № 3. — С. 13, 14.
8. **Кудряшов, С. И.** Повышение надежности погружных систем УЭЦН на примере опыта эксплуатации в ОАО «Юганскнефтегаз» / С. И. Кудряшов // Нефтяное хозяйство. — 2005. — № 6. — С. 126, 127.
9. **Перельман, О. М.** Статистический анализ надежности погружных установок в реальных условиях эксплуатации / О. М. Перельман, С. Н. Пещеренко, А. И. Рабинович [и др.] // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. — 2003. — № 3. — С. 28–34.
10. **Здольник, С. Е.** Повышение надежности УЭЦН для работы в условиях интенсифицированных скважин / С. Е. Здольник, Д. В. Маркелов // Бурение и нефть. — 2005. — № 5. — С. 20–23.
11. **Кудряшов, С. И.** Повышение надежности погружных систем УЭЦН на примере опыта эксплуатации в ОАО «Юганскнефтегаз» / С. И. Кудряшов // Нефтяное хозяйство. — 2005. — № 6. — С. 126, 127.
12. **Ухалов, К. А.** Методология оценки эксплуатационной надежности работы УЭЦН / К. А. Ухалов, Р. Я. Кучумов // Изв. вузов. Нефть и газ. — 2002. — № 4. — С. 26–29.
13. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87, 88.
14. **Кузин, В. В.** Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41–45.
15. **Kuzin, V. V.** Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.
16. **Волосова, М. А.** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // Металловедение и термическая обработка. — 2012. — № 1. — С. 40–46.
17. **Volosova, M. A.** Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / M. A. Volosova, V. V. Kuzin // Met. Sci. Heat Treat. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.
18. **Кузин, В. В.** Особенности эксплуатации канавочных резцов с керамическими пластинами при обработке деталей из закаленных сталей / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 8. — С. 73–77.
19. **Kuzin, V. V.** Performance of channel cutters with ceramic plates in machining quenched steel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2013. — Vol. 33, № 1. — P. 24–28.
20. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности SiSiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 179–185.
21. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with SiSiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 214–219.
22. **Кузин, В. В.** Технологическое обеспечение качества кромок колец пары трения из карбида кремния для торцовых уплотнений насосов / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 11. — С. 65–69.
23. **Кузин, В. В.** Влияние режимов алмазного шлифования на триботехнические характеристики керамики на основе оксида алюминия / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, А. Е. Селезнев // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 475–481.
24. **Kuzin, V. V.** Effect of conditions of diamond grinding on tribological behavior of alumina-based ceramics / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, A. E. Seleznev // Journal of Friction and Wear. — 2016. — Vol. 37, № 4. — P. 371–376.
25. **Григорьев, С. Н.** Износ кольца из SiC керамики в контакте со стальным шариком / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров [и др.] : сб. тез. статей Междунар. науч.-техн. конф. «Полимерные композиты и трибология 2015». — С. 188. ■

Получено 14.12.17

© В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, В. Л. Реутов,
В. В. Кощеев, 2018 г.