

УДК 620.1:669.14

И.В. Гулина¹, О.В. Седов¹, Н.О. Яковлев¹, А.В. Гриневич¹

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83

В статье затронута проблема оценки прочностных характеристик подшипниковой стали для определения ее работоспособности в элементах подшипника. Поскольку большинство характеристик работоспособности материала в подшипнике коррелируют с пределом прочности материала, то испытания на растяжение были приняты как базовые. Однако стандартные образцы оказались неприемлемыми для оценки прочности подшипниковой стали. Разрушение образцов происходило в галтелях, являющихся концентраторами напряжений. Доработка изготовленных образцов с формированием корсетной рабочей части позволила определить предел прочности подшипниковой стали. При испытаниях на квазистатическое растяжение подшипниковой стали установлен двухстадийный характер разрушения образца, когда при статическом разрушении формируется волна растяжения, приводящая к отколу.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, прочность при растяжении, волновое разрушение, откол, отрыв, концентратор напряжения, хрупкость.

I.V. Gulina¹, O.V. Sedov¹, N.O. Yakovlev¹, A.V. Grinevich¹

FEATURES OF THE TESTED BEARING STEEL

The work deals with the problem of assessing the strength characteristics of bearing steel to determine its performance in the bearing elements. Since most of the performance characteristics of the material in the bearing correlate with the ultimate strength of the material, tensile tests were taken as basic. However, the standard samples was not acceptable to assess the strength of the bearing steel. Specimen failures occurred in the fillets, which are stress concentrators. Completion of the manufactured samples with the formation of the corset working part allowed to determine the ultimate strength of the bearing steel. When testing for quasi-static tension of bearing steel, a two-stage character of the sample failure is established, when a static fracture forms a tensile wave leading to a breakaway.

Keywords: bearing steel, tensile strength, wave failure, spallation, separation, stress concentrator, brittleness.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Разработка материала для подшипников, эксплуатирующихся при предельных уровнях нагрузки, является одной из актуальных задач авиационного материаловедения [1, 2]. Повышение нагрузок на агрегаты газотурбинных двигателей нового поколения диктует ужесточение требований к прочностным характеристикам материалов, используемых в наиболее ответственных деталях двигателя – подшипниках [3].

Материал в составных элементах подшипника (кольцах, шариках и роликах) работает в крайне сложных условиях нагружения [4]. Минимальная зона соприкосновения

кольца и шарика, необходимая для обеспечения эффективной работы подшипника качения, приводит к высоким контактным напряжениям. Локальность контактных напряжений может привести к смятию рабочих поверхностей кольца и тел качения с последующим разрушением элементов подшипника. Контактные нагрузки наряду со статическим нагружением носят в основном переменный характер, на который в ряде случаев накладываются динамические и вибрационные воздействия. Реализация качения, тем не менее, сопровождается проскальзыванием катящихся шариков и роликов по кольцам, что приводит к трению между элементами подшипника и, как следствие, к их истиранию. Специфика работы материала в подшипнике диктует необходимость создания материала с особыми свойствами и структурой, включая и требования эксплуатации при повышенных температурах [5–7].

Для обеспечения высокой работоспособности элементов подшипника, к применяемому в нем материалу предъявляются базовые требования, которым он должен соответствовать – высокие прочность, упругость, сопротивление истиранию и контактной усталости. Реализация предельных показателей работоспособности материалов возможна только на основе современных достижений в области металлургии и металловедения [8–10]. Несмотря на то что определяющим критерием оценки материала является его эксплуатационная надежность при работе непосредственно в подшипнике, разработка композиции и режимов термической обработки опирается на стандартные механические испытания.

Отдельные характеристики работоспособности элементов подшипника определяются при общепринятых испытаниях на растяжение. Предел прочности при растяжении характеризует как статическую прочность шарика при сжатии, так и его контактную прочность. Высокая упругость элементов подшипника обеспечивается при приближении предела текучести материала к пределу прочности. Очевидно, что при этом пластичность материала становится крайне незначительной и материал будет склонен к хрупкому разрушению. Высокое сопротивление истиранию хорошо коррелируется с высокой твердостью, которая также обеспечивает и высокое сопротивление смятию. Высокая твердость в свою очередь коррелирует с высокой прочностью при растяжении. Следовательно, разработка стали для подшипников ориентирована на достижение максимальных твердости и прочности, критериальной характеристикой которых может явиться предел прочности при растяжении. Предел прочности является основной расчетной характеристикой для конструкционных материалов [11]. Именно данная характеристика прочности явилась базовой при разработке стали для подшипников.

Материалы и методы

Методика и объект испытаний

В качестве объекта испытаний выбрана одна из опытных плавок подшипниковых сталей, работы по которым отражены в статье [12]. Данные стали предназначены для применения в элементах высоконагруженного подшипника. Корректная оценка прочностных характеристик подшипниковых сталей представляется достаточно сложной задачей в связи с их исключительной хрупкостью. На хрупкость подшипниковых сталей указывают практически нулевые показатели характеристик пластичности – относительного удлинения и относительного сужения после разрыва.

Изначально предполагалась оценка прочностных показателей на стандартных образцах, используемых при испытаниях высокопрочной стали с уровнем прочности порядка 2000 МПа [13]. Эскизы образцов представлены на рис. 1.

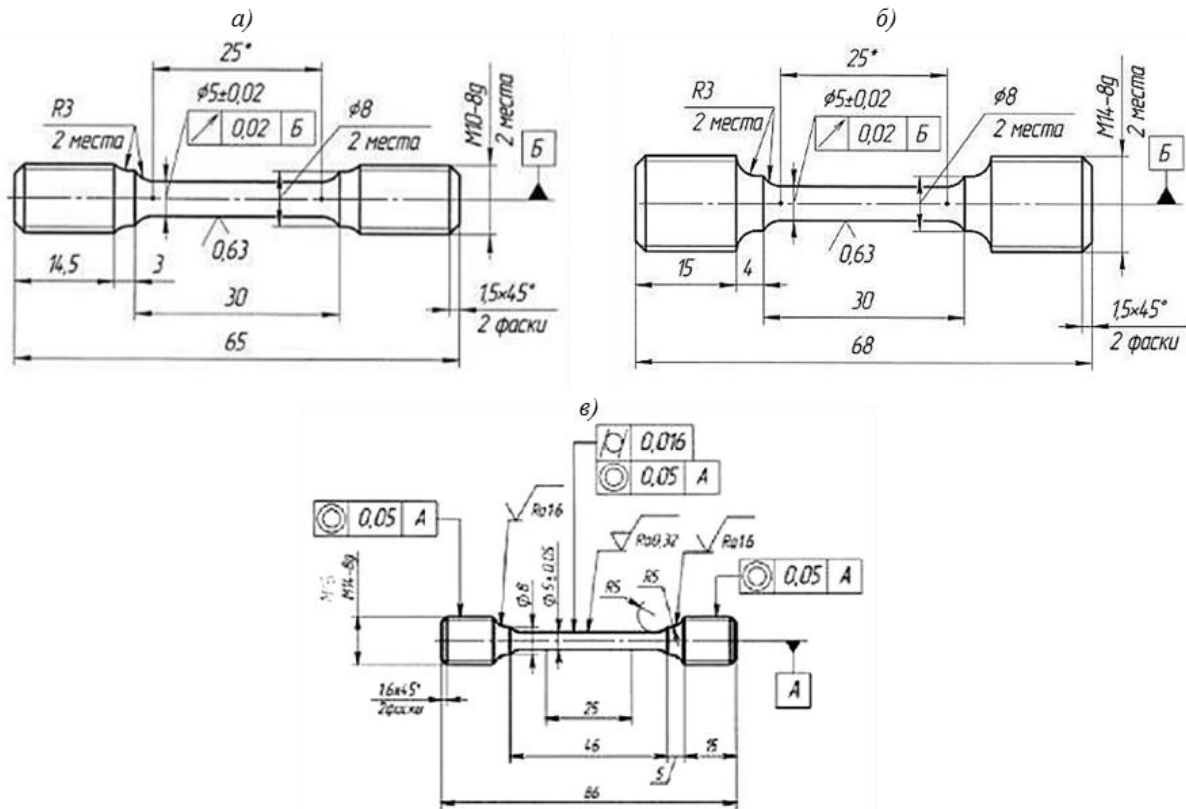


Рис. 1. Исходные эскизы образцов для испытаний на растяжение при длине рабочей части 25 мм с диаметром резьбы M10 (а) и M14 (б), а также с длиной рабочей части 40 мм (M14) (в)

Геометрическая форма образцов отличается длиной рабочей части, а также диаметром резьбы в зоне захвата. В связи с высокой чувствительностью подшипниковых сталей к концентраторам напряжений необходимо использовать захватную часть образца с резьбой M14. Наряду с использованием резьбы M14 опробована и захватная часть с резьбой M10. Длина рабочей части для нескольких образцов увеличена с 25 до 40 мм, что позволило использовать датчик продольной деформации *makroXtens* для определения модуля упругости и записи диаграммы деформации.

Определение прочностных характеристик проводили на электромеханической испытательной машине при растяжении со скоростью перемещения траверсы 5 мм/мин (в дальнейшем используем термин «квазистатическое растяжение», который более объективно отражает суть испытаний). Погрешность определения нагрузки на испытательном комплексе составляет 0,5%. Для оценки предела текучести ($\sigma_{0,2}$) использовали датчик продольной деформации *makroXtens*, который отходил от образца при заданном уровне деформации образца. Предел деформации ограничен величиной 0,25%, поскольку хрупкое разрушение образца могло повредить датчик деформации.

Результаты испытаний

Испытывали образцы трех партий, которые отличаются различными режимами термической обработки. Первоначально в рамках первой выборки испытаны единичные образцы от каждой партии. Диаграммы деформации образцов первой выборки представлены на рис. 2.

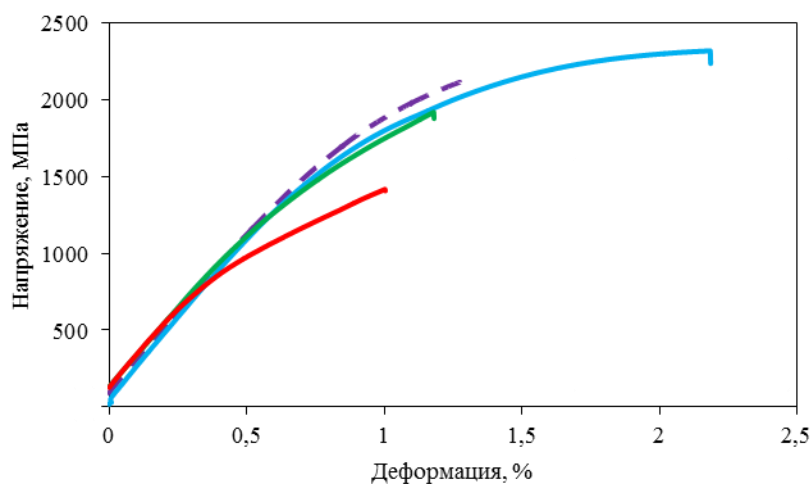


Рис. 2. Диаграммы деформации образцов из подшипниковой стали первой выборки с условным номером 1-1 (—), 1-2 (—), 2-1 (—) и 3-1 (—) (см. табл. 1)

Результаты определения прочностных характеристик образцов подшипниковой стали первой выборки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Прочностные характеристики образцов подшипниковой стали первой выборки

Условный номер партии	Условный номер образца	Эскиз образца (см. рис. 1)	Диаметр образца, мм	Разрушающая нагрузка, Н	Напряжение разрушения, МПа	Модуль упругости, ГПа
1	1-1	<i>a</i>	5,00	41570	2120	212
1	1-2	<i>б</i>	5,00	45580	2320	212
2	2-1	<i>в</i>	5,00	37730	1920	206
3	3-1	<i>г</i>	4,99	27750	1420	210

Характер разрушения образцов представлен на рис. 3.

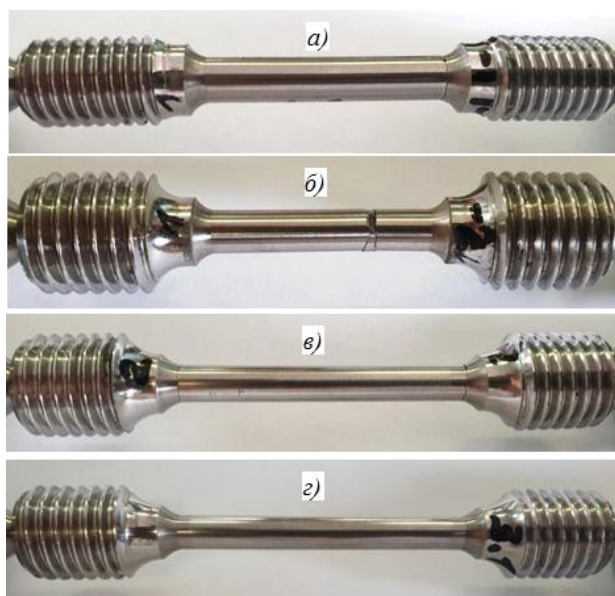


Рис. 3. Характер разрушения образцов из подшипниковой стали:

a – образец 1-1 разрушен на две части по галтели; *б* – образец 1-2 разрушен на три части в рабочей зоне; *в* – образец 2-1 разрушен на три части по галтелям; *г* – образец 3-1 разрушен на две части по галтели

Разрушение образца 1-1 произошло по галтели: излом – макрорупкий; поверхность излома неоднородна, с очагом разрушения в центре образца и развивающимися из него разноплоскостными поверхностями разрушения; имеет место незначительная вогнутость излома в сторону захватной части.

Разрушение образца 1-2 произошло в его рабочей части, но с образованием двух плоскостей разрушения и образованием промежуточного осколка с разнотолщиной от 0,80 до 1,89 мм. Разнотолщинность образца обусловлена различным характером разрушения его плоскостей. Первая плоскость разрушения, находящаяся в ~18 мм от галтели, имеет излом с двумя очагами разрушения, направленными навстречу друг другу. Очаги разрушения находятся в двух плоскостях, отстоящих одна от другой на 1,02 мм. Излом имеет исключительно гладкую поверхность, за исключением небольшой зоны очагов разрушения. Вторая поверхность разрушения, отстоящая от галтели на ~7 мм, практически перпендикулярна оси образца и характеризуется однородностью излома. При общей однородности излома в нем выделяется большой плоский участок, охватывающий почти половину образца и являющийся инициатором развивающегося разрушения.

Образец 2-1 разрушился по двум галтелям. В зоне одной галтели поверхность разрушения рельефная с выступами и перепадами по высоте, обусловленными разноплоскостностью развития разрушения. При этом поверхность разрушения вогнута в зону галтели. На факт разрушения самой галтели указывает локальное увеличение диаметра рабочей части образца в зоне разрушения на 0,12 мм. Характер разрушения образца 2-1 в противоположной галтели имеет кардинальные отличия. Поверхность разрушения более плоская и располагается в рабочей части образца на границе с галтелью, на что указывает диаметр, замеренный в плоскости второго разрушения. Разрушение во второй галтели – многоочаговое, по-видимому, началось одновременно в нескольких точках, что привело к полному разделению поверхностей.

Образец 3-1 разрушился по галтели, на что указывает замер диаметра в плоскости разрушения с его увеличением на 0,11 мм. Отмечается небольшая вогнутость поверхности разрушения в сторону галтели. На поверхности излома наблюдается плоская «ногтеобразная» зона исходного разрушения, которая, распространяясь веерообразно, привела к разрушению образца.

Исходные испытания показали, что разрушение образцов в основном происходило у галтели – за пределами рабочей зоны, что исключало возможность определения относительного удлинения. Предел прочности, полученный для данного вида разрушения, не отражает реальной прочности материала, поскольку зона галтели является концентратором напряжений. Для хрупких материалов, разрушающихся без значимых пластических деформаций, к которым относятся и подшипниковые стали, наличие концентратора напряжений является критичным. Для геометрической формы образцов, представленных на рис. 1, теоретический коэффициент концентрации напряжений составляет $K_t \approx 1,2$ (рис. 1, а и б) и $K_t \approx 1,3$ (рис. 1, в) в случае идеального (без надреза) исполнения [14].

Первая серия испытаний показала невозможность определения прочностных характеристик на стандартных образцах, используемых при оценке прочности высокопрочных конструкционных материалов. Хрупкость подшипниковой стали приводит в большинстве случаев к разрушению от концентратора напряжений, поскольку пластичность этой стали не снимает пиковых значений напряжений в локальной зоне концентратора.

Интересен и характер разрушения образцов. Вместо традиционного разрушения образцов из высокопрочной стали на две части и единичной плоскости разрушения, образцы из подшипниковой стали имели две зоны разрушения. Образец 2-1 разрушился на три части, причем зона разрушения приходилась на галтели.

Поскольку принятая геометрическая форма образцов, разработанная для конструкционных сталей ($\sigma_b < 2000$ МПа), не обеспечивала корректное определение предела

прочности для сверхпрочной и хрупкой подшипниковой стали, изготовленные образцы доработали. Доработка сводилась к созданию корсетной формы рабочей части образца с уменьшением ее диаметра до 4 мм. Эскиз рабочей части образца представлен на рис. 4. Теоретический коэффициент концентрации напряжений для данной конфигурации рабочей части образца равен $K_t \approx 1,03$ [14].

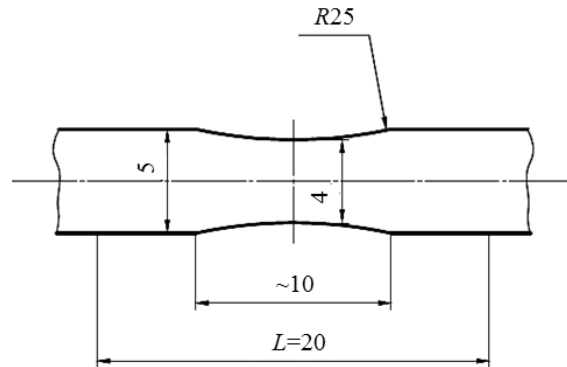


Рис. 4. Форма корсетной части доработанных образцов из подшипниковой стали

Диаграммы «нагрузка–перемещение траверсы» представлены на рис. 5. Результаты испытаний доработанных образцов с корсетной рабочей частью представлены в табл. 2.

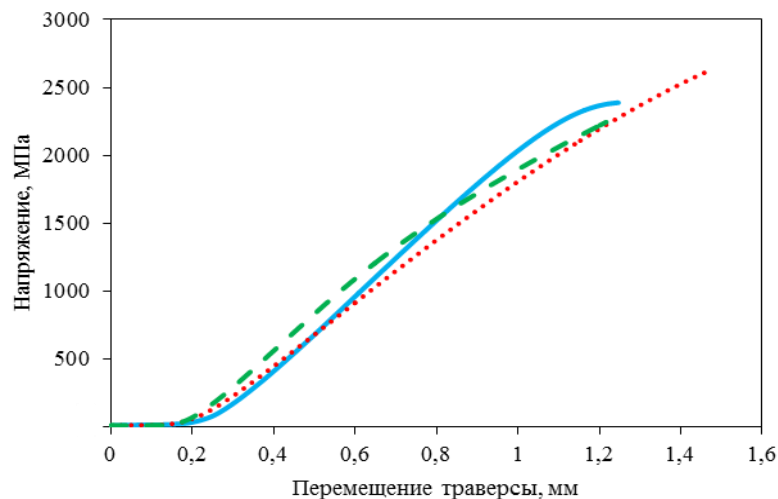


Рис. 5. Диаграммы «нагрузка–перемещение траверсы» для доработанных образцов из подшипниковой стали 1-6 (—), 2-2 (••••) и 3-3 (---) (см. табл. 2)

Таблица 2

Напряжение разрушения доработанных образцов с корсетной рабочей частью

Условный номер партии	Условный номер образца	Эскиз образца (см. рис. 1)	Диаметр образца, мм	Разрушающая нагрузка, Н	Напряжение разрушения, МПа
1	1-3	<i>a</i>	4,04	29285	2590
1	1-4	<i>a</i>	4,02	32305	2550
1	1-5	<i>a</i>	4,01	32680	2590
1	1-6	<i>б</i>	4,05	30720	2390
1	1-7	<i>б</i>	3,96	31790	2580
2	2-2	<i>в</i>	4,03	33600	2610
2	2-3	<i>в</i>	3,97	33575	2710
3	3-2	<i>в</i>	4,05	29285	2290
3	3-3	<i>в</i>	4,01	28355	2270
3	3-4	<i>в</i>	3,99	29215	2340

Анализ результатов второй серии испытаний показал правомерность использования корсетной формы образца, поскольку она позволяет корректно определить предел прочности исследуемого материала. Получены достоверные показатели прочности, а именно – предел прочности, что позволяет выбрать оптимальный режим термообработки стали. При использовании образца с корсетной частью приходится отказаться от традиционных прочностных характеристик: условного предела текучести и относительного удлинения после разрыва.

Несмотря на локализацию максимальных напряжений в корсетной зоне образца, его разрушение носит сложный характер, характеризуемый двумя плоскостями разрушения. Если в традиционных образцах двойное разрушение, как правило, имело место в концентраторах напряжений – у галтелей, то в корсетных образцах двойное разрушение приходится на корсетную зону. Плоскости разрушения находятся на расстоянии 0,5–1,5 мм друг от друга. Двойное разрушение в корсетной зоне образца представлено на рис. 6.



Рис. 6. Характер разрушения образца с корсетной рабочей частью

Исследование поверхностей излома образцов с корсетной частью выявило различный характер поверхностей разрушения при разрушении корсетного образца на три части. При этом одна поверхность излома имеет рельефный разноуровневый характер разрушения, различный для большинства образцов, а другая поверхность разрушения имеет плоский характер. Различный характер разрушения образцов, распадающихся на три части, указывает на различный механизм разрушения и его двухстадийный вариант.

Результаты и обсуждение

Двухстадийное разрушение образцов из подшипниковой стали не укладывается в предположение об абсолютном равенстве зон разрушения, идентичность которых приводит к одновременному разрушению этих двух зон. Наиболее правомерным является предположение о волновом характере разрушения.

Общеизвестны случаи явлений «откола» при испытании броневых плит, когда на тыльной стороне плиты образуется «откол» в результате ударного воздействия по внешней стороне плиты [15]. Внешний импульс создает волну сжатия, которая проходит через плиту, не разрушая ее. Однако достигнув тыльной стороны, волна сжатия отражается как волна растяжения. Если напряжение, создаваемое волной растяжения, превосходит сопротивление отрыва для данного материала, то возникает разрушение (расслоение) материала по толщине и, как следствие, «откол» тыльной поверхности плиты. Аналогичную картину можно представить и для случая разрушающегося образца из подшипниковой стали. Статическое разрушение образца приводит к возникновению волны разгрузки. Растянутый образец возвращается в ненагруженное состояние. Волну разгрузки следует рассматривать как волну сжатия. Волна сжатия, отражаясь от свободной поверхности, превращается в волну растяжения, которая приводит к формированию поверхности отрыва. Исследования в области волнового разрушения материалов установили сложный характер волны для материала, обладающего пластичностью. Пластичность конструкционных материалов снимает напряжение раньше, чем произойдет разрушение. Испытания образцов из конструкционных сталей, обладающих даже незначительными пластическими характеристиками, никогда не приводили к двухстадийному разрушению. В хрупких подшипниковых сталях сопротивление отрыву практически совпадает с пределом прочности, что является одной из предпосылок хрупкого «откола».

Заключения

Показана необходимость разработки новой геометрической формы образцов для испытания подшипниковой стали при квазистатическом растяжении, поскольку стандартные образцы, используемые для определения прочностных характеристик высокопрочной стали, неприемлемы.

Для определения предела прочности при квазистатическом растяжении хрупких подшипниковых сталей целесообразно использовать образцы с рабочей частью корсетного типа.

Установлен двухстадийный характер разрушения хрупкой подшипниковой стали на образцах, испытываемых квазистатическим растяжением, при котором после статического разрушения имеет место разрушение волнового характера, характеризующееся отрывом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
3. Уткин В.М., Никонов А.Г., Прокша Ф.Н. Сравнение норм отечественных и зарубежных нормативных документов на качество шарико- и роликоподшипниковой стали. М.: Черметинформация, 1975. 56 с.
4. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
5. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
6. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963. 340 с.
7. Контер Л.Я. Стали для теплостойких подшипников (обзор). М.: НИИНАвтопром, 1978. Сер.: XII. 78 с.
8. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
9. Крылов С.А., Маркова Е.С., Щербаков А.И., Якушева Н.А. Металлургические особенности выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 14–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-14-20.
10. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов*. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
11. Гриневиц А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
12. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
13. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тоньшева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
14. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
15. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Гришук Л.Б. Динамика удара. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 296 с.