

УДК 669.14.018.8

*Е.Н. Коробова<sup>1</sup>, Г.С. Севальнев<sup>1</sup>, В.И. Громов<sup>1</sup>, А.В. Леонов<sup>1</sup>***СТАЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ  
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11

*Представлен обзор тепло- и коррозионностойких сталей отечественного и зарубежного производства, применяемых для изготовления авиационных подшипников качения. Описаны требования, предъявляемые к подшипниковым сталям, классификация сталей в зависимости от условий работы, способ производства. Показаны химические составы сталей и принципы легирования, проведен анализ свойств. Рассмотрены свойства керамических материалов и возможность их применения для подшипников, используемых в авиакосмической отрасли.*

**Ключевые слова:** подшипниковые стали, свойства, карбидная неоднородность, микроструктура, твердость, теплостойкость, керамические материалы.

*Е.Н. Korobova<sup>1</sup>, G.S. Sevalnev<sup>1</sup>, V.I. Gromov<sup>1</sup>, A.V. Leonov<sup>1</sup>***STEELS FOR THE MANUFACTURE OF ROLLER BEARINGS  
FOR SPECIAL PURPOSES (review)**

*An overview of heat and corrosion-resistant steels of domestic and foreign production, used for the manufacture of aircraft rolling bearings, is presented. The requirements for bearing steels, the classification of steels depending on the operating conditions, and the method of production are described. The chemical compositions of the steels and the principles of alloying are shown, and the analysis of the properties is carried out. The properties of ceramic materials and the possibility of their application for bearings used in the aerospace industry are considered.*

**Keywords:** bearing steels, properties, carbide heterogeneity, microstructure, hardness, heat resistance, ceramic materials.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Подшипники качения, используемые в различных отраслях промышленности, являются ответственными деталями, которые испытывают различного рода напряженное состояние при эксплуатации в условиях циклических нагрузок. Качество деталей подшипников качения определяется их конструкцией, технологией изготовления и свойствами используемого материала. Требования, которые предъявляются в авиационной и космической промышленности к качеству материалов для специальных подшипников качения, значительно превосходят требования, предъявляемые к материалам, применяемым в других областях машиностроения.

Основной эксплуатационной характеристикой, определяющей долговечность авиационных подшипников, является контактная выносливость – способность материала сопротивляться контактной усталости при эксплуатации в условиях

циклических нагрузок. Данная характеристика является структурно-чувствительной и во многом зависит от степени рафинированности (в особенности это касается силикатов и оксидов), карбидной неоднородности и окончательно сформированной микроструктуры стали.

Особые требования по структуре и неметаллическим включениям подшипниковых сталей вызвали необходимость применения в производстве вакуумно-индукционной выплавки с последующим вакуумно-дуговым переплавом (метод VIM VAR – Vacuum Induction Melting and Vacuum Arc Remelting), позволяющей значительно снизить загрязненность подшипниковых сталей.

Особое внимание в процессе производства деталей подшипников уделяется технологии термической обработки, поскольку получаемая микроструктура определяет качество готового изделия. Закалка с оптимальной температуры с достаточным временем выдержки, обеспечивающая заданные механические свойства, предусматривает формирование в подшипниковой стали структуры мартенсита со степенью дисперсности от скрытоигольчатого мартенсита до среднеигольчатого с мелкими избыточными фазами. Размеры и класс точности изготавливаемого подшипника качества во многом влияют на регламентированное количество аустенитной фазы, так как в процессе эксплуатации от этого зависит стабильность размеров опоры качения специального подшипника. Поэтому для реализации механизма распада с целью минимизации содержания аустенитной фазы в микроструктуре стали особенно важно контролировать тепловые режимы нагрева и колебания температурного поля при упрочняющей термической обработке.

Согласно данным научно-технической литературы [1–4], подшипниковые стали классифицируют в зависимости от условий эксплуатации:

- работающие в условиях невысоких температур (до 300 °С) и неагрессивных сред. К таким сталям обычно относят низко- и среднелегированные конструкционные стали;
- работающие в условиях агрессивных коррозионных сред и экстремальных температурных нагрузок (кратковременно при 500 °С). К таким сталям относят высоколегированные коррозионно- и теплостойкие подшипниковые стали.

Совершенствование двигателей, а также изделий гражданского и военного назначения нового поколения диктует необходимость постоянного улучшения конструкций подшипников, повышения их грузоподъемности, долговечности и надежности при работе в условиях многоциклового контактно-усталостного нагружения. В настоящее время при изготовлении деталей авиационных подшипников наряду с традиционно применяемыми сталями стали широко использоваться керамические материалы (в конструкциях гибридных подшипников). Исследование фрикционного взаимодействия разнородных материалов в условиях контактно-усталостного нагружения позволяет разрабатывать новые материалы и конструкции с такими свойствами, которые отвечают требованиям, необходимым при изготовлении агрегатов различного назначения и двигателей нового поколения.

Разработка новых конкурентоспособных отечественных сталей, используемых для изготовления подшипников различного назначения, является одной из приоритетных задач современного материаловедения. В настоящее время при реализации задач по импортозамещению в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ осуществляются исследования по разработке новых составов подшипниковых сталей [5–12].

### Теплостойкие подшипниковые стали

Подшипники качения, которые эксплуатируются в температурном интервале 200–300 °С при условии постоянного присутствия смазочного материала в зоне

контакта, должны обладать высокой теплостойкостью при работе в режиме «смазочного голодания». Внешние факторы, способствующие выдавливанию смазочного материала из зоны контакта, приводят к формированию экстремальных условий эксплуатации и повышению рабочей температуры до 500 °С. Для стабилизации структуры и свойств при данной температуре применяют комплексно-легированные теплостойкие стали, подвергаемые дисперсионному твердению. Температура, используемая при заключительной обработке данных сталей, как правило, составляет >500 °С, что обеспечивает высокую теплостойкость.

Анализ номенклатуры основных теплостойких сталей, применяемых для изготовления подшипников газотурбинных двигателей, показал, что в отечественной авиационной промышленности наиболее часто используется инструментальная сталь мартенситного класса марки ЭИ347 (8Х4В9Ф2), за рубежом – сталь марки М50. Химический состав стали М50 практически без изменения взят за основу для разработки теплостойких подшипниковых сталей и в других странах. Например, во Франции это сталь 80DCV40 [13], в Германии – сталь 80MoCrV4216 [14].

Многолетний опыт исследования подшипников показывает, что сталь марки М50 зарекомендовала себя как материал с более высокой долговечностью по сравнению со сталью ЭИ347. Для производства конкурентоспособных теплостойких отечественных подшипников в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создана новая теплостойкая подшипниковая сталь марки ВКС241 [15]. Составы указанных теплостойких подшипниковых сталей представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав теплостойких подшипниковых сталей [1, 16, 17]**

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)												
	Cr	C	Mo	W	Ni	P	Cu	S	V	Nb	Ta	Mn	Si
					не более								
ЭИ347	4,0–4,6	0,70–0,80	≤0,8	8,5–9,5	0,35	0,030	0,25	0,015	1,4–1,7	–	–	≤0,25	≤0,25
ВКС241	4,5–5,5	0,70–0,85	3,0–3,5	1,0–1,5	0,15–0,40				0,5–1,0	0,1–0,3	0,05–0,15	0,10–0,40	0,30–0,50
М50	3,75–4,25	0,77–0,85	4,0–4,5	–	0,10	0,015	–	0,015	0,9–1,1	–	–	≤0,35	≤0,25
80MoCrV4216	3,75–4,25	0,77–0,85	4,0–4,5	–	0,10	0,015	–	0,015	0,9–1,1	–	–	≤0,35	≤0,25
80DCV40	3,75–4,50	0,77–0,85	3,75–4,50	0,25	0,20	0,015	0,20	0,015	0,9–1,2	–	–	0,10–0,40	0,10–0,40

Высокие значения теплостойкости представленных сталей (сохранение твердости ≥60 HRC после нагревов до 500 °С) обеспечиваются благодаря включению в состав стали тугоплавких легирующих элементов, таких как W и Mo. Например, в стали М50 основным тугоплавким элементом является молибден, в стали ЭИ347 – вольфрам, а в стали ВКС241 присутствуют оба элемента. Благодаря высокому содержанию вольфрама (9 % (по массе)) сталь ЭИ347, в отличие от сталей М50 и ВКС241, обладает красностойкостью (выдержка при температуре 620 °С в течение 4 ч снижает твердость на 1–2 ед.).

Однако наличие такого количества W в стали ЭИ347 способствует образованию в микроструктуре большой карбидной неоднородности. Вольфрам образует крупные скопления нерастворимых карбидов типа M<sub>6</sub>C, которые сильно коагулируют при замедленном охлаждении и имеют существенную склонность к образованию угловатой формы, что снижает контактную выносливость и приводит к выкрашиванию рабочей поверхности подшипников в зоне контакта в процессе эксплуатации [2]. Кроме того,

крупные сегрегации нерастворимых карбидов при производстве полуфабрикатов из стали ЭИ347 значительно усложняют процессковки. Сталь ВКС241 благодаря частичной замене вольфрама молибденом более пластична и технологична по сравнению со сталью ЭИ347, однако, аналогично стали М50, не обладает красностойкостью.

Схема упрочнения указанных сталей включает закалку с температур, обеспечивающих наиболее полное растворение избыточных фаз, и последующий многократный отпуск для снижения доли остаточного аустенита в структуре стали и выделения специальных карбидов. С целью исключения обезуглероживания и роста зерна закалку высокоуглеродистых подшипниковых сталей традиционно проводят в солевых ваннах [3]. Наиболее полного предохранения подшипниковых сталей от окисления и обезуглероживания достигают при вакуумном нагреве. Вакуумная термическая обработка является современной альтернативой классической технологии термической обработки подшипниковых сталей в солевых ваннах. Внедрение данной технологии в производство авиационных подшипников – одна из актуальных задач в авиационной промышленности.

### Цементуемые теплостойкие подшипниковые стали

Для крупногабаритных подшипников, работающих в условиях динамических и ударных нагрузок при повышенных температурах, а также в случае применения посадок с большим натягом используются теплостойкие цементуемые стали, имеющие вязкую сердцевину и высокую твердость поверхности. Более того, применение низкоуглеродистых цементуемых сталей дает возможность использовать сварку для сложных деталей, которые могут содержать и подшипники, и шестерни, и детали крепежа, и т. п. [4].

Цементация подшипниковых сталей позволяет повысить износостойкость, предел выносливости, контактно-усталостную долговечность благодаря сжимающим напряжениям на поверхности изделий после термообработки, а также наличию в цементованном слое карбидной фазы, полученной при диффузионном насыщении, и спецкарбидов, образующихся при дисперсионном твердении.

За рубежом для крупногабаритных подшипников широко применяется цементуемая теплостойкая сталь М50NiL (США) с твердостью поверхности  $\geq 60$  HRC, твердостью сердцевины  $\leq 45$  HRC, которая работоспособна при температуре до 500 °С [2, 18]. За основу при создании стали М50NiL взят химический состав стали М50. Снижение углерода (аустенитообразователя) в составе стали М50NiL компенсировали соответствующим количеством никеля. Отечественная авиационная промышленность испытывает потребность в разработке цементуемых подшипниковых сталей, аналогичных зарубежному аналогу – стали М50NiL.

Химический состав [1, 16] теплостойкой цементуемой стали М50NiL, % (по массе):

C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Mo	Ni
0,11–0,15	0,15–0,35	0,015	0,008	0,10–0,25	4,00–4,25	1,1–1,3	–	4,0–4,5	3,2–3,6

### Коррозионностойкие подшипниковые стали

Для изготовления подшипников, работающих в агрессивных средах, используют высокохромистые стали, которые сочетают высокую твердость с необходимым уровнем коррозионной стойкости. Химический состав наиболее применяемых коррозионностойких сталей для подшипников представлен в табл. 2 [1, 19].

Таблица 2

## Химический состав коррозионностойких подшипниковых сталей

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Co
95X18	0,9–1,00	≤0,80	≤0,70	17,0–19,0	≤0,30	≤0,250	–	–	–
110X18M	1,1–1,20	0,53–0,93	0,50–1,00	16,5–18,0	≤0,30	≤0,300	0,50–0,80	–	–
440B	0,75–0,95	≤1,00	≤1,00	16,0–18,0	–	≤0,025	–	–	–
440C	0,95–1,20	≤1,00	≤1,00	16,0–18,0	–	≤0,025	≤0,75	–	–
CSS-42L	0,15	–	–	14,0	2,00	–	4,75	0,60	12,50
Pyrowear 675	0,07	–	–	13,0	2,50	–	–	0,60	5,50

В настоящее время в России коррозионностойкие подшипники изготавливают из сталей 95X18 и 110X18M. Сталь 95X18 после закалки и низкого отпуска обладает твердостью 58–60 HRC и удовлетворительной коррозионной стойкостью, однако при повышении температуры до 500 °С происходит существенное снижение твердости и коррозионной стойкости из-за дестабилизации сформированной структуры. На основе стали 95X18 разработана сталь 110X18M, обладающая большей теплостойкостью (при температуре до 400 °С) и высокой коррозионной стойкостью благодаря добавке молибдена [1].

За рубежом коррозионностойкие подшипники изготавливают из сталей 440B и 440C (440C Modified), являющихся аналогами отечественных сталей 95X18 и 110X18M соответственно. Для более высоких температур (до 500 °С) используют коррозионностойкую низкоуглеродистую сталь CSS-42L, упрочняемую цементацией или азотированием, и менее легированную коррозионностойкую сталь Pyrowear 675. Вследствие низкого содержания углерода и высокого содержания кобальта, интенсифицирующего процессы диффузии и дисперсионного твердения, при температуре 500 °С в этих сталях происходит активное поверхностное упрочнение, формирующее высокую теплостойкость.

Основным направлением развития материалов нового поколения для коррозионностойких подшипников является разработка коррозионностойких подшипниковых сталей со сверхравновесным содержанием азота, превышающим предельную растворимость в нормальных условиях. Азот, аналогично углероду, упрочняет сталь, однако не вызывает при этом сильного охрупчивания. Кроме того, азот сдерживает образование  $\delta$ -феррита, характерного для высокохромистых коррозионностойких сталей, который снижает пластичность. Введение азота в металл в количествах, превышающих его предельную растворимость, возможно при выплавке с избыточным давлением в рабочем пространстве печи. Наиболее широко применяемыми методами получения сталей со сверхравновесным содержанием азота являются электрошлаковый переплав под давлением, плазменно-дуговой переплав и выплавка стали в вакуумной индукционной печи под давлением методом большой сталеплавильной ванны [20–27].

Коррозионностойкие стали мартенситного класса со сверхравновесным содержанием азота применяют в основном для изготовления высокоточных приборных подшипников. Ввиду того, что в структуре формируются мелкодисперсные упрочняющие карбонитриды легирующих элементов хрома и ванадия, сталь обладает высокими показателями твердости (>58 HRC); при взаимодействии тела и опоры качения не происходит возрастания уровня шума и вибраций благодаря отсутствию в структуре стали крупных избыточных фаз.

За рубежом в авиакосмической отрасли применяют подшипники из высокоазотистых сталей марок Cronidur 30 (компания Energietechnik Essen GmbH,

Германия), XD15NW (компания Aubert & Duval, Франция), N360 (компания Böhler International GmbH, Австрия), сочетающие высокие показатели механических и трибологических свойств с твердостью не менее 58 HRC и высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах [28–33].

В рамках реализации работ по импортозамещению в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана новая сталь марки ВНС-78 со сверхравновесным содержанием азота [30]. Технология изготовления стали включает использование печи электрошлакового переплава под давлением – уникального оборудования, не имеющего аналогов в стране. Сверхравновесное содержание азота в стали марки ВНС-78 обеспечивает высокие прочностные характеристики, твердость  $\geq 58$  HRC, мелкозернистую структуру с равномерным распределением карбонитридов размером до 3 мкм в отличие от традиционно применяемых подшипниковых сталей типа 95X18 с размером карбидов 20–25 мкм.

Химический состав коррозионностойких подшипниковых сталей со сверхравновесным содержанием азота представлен в табл. 3 [28–34].

*Таблица 3*

**Химический состав коррозионностойких подшипниковых сталей со сверхравновесным содержанием азота [28–34]**

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	V	La	Y
Cronidur 30	0,25–0,35	1,0	1,0	14,0–16,0	0,5	0,85–1,10	0,30–0,50	–	–	–
XD15NW	0,37–0,45	0,6	0,6	15,0–16,5	$\leq 0,3$	1,50–1,90	0,16–0,25	–	–	–
N360	0,30	0,6	0,4	15,0	–	1,00	0,40	–	–	–
ВНС-78	0,30–0,35	0,5–1,0	0,2–0,5	13,5–15,5	0,3–1,0	0,75–1,00	0,25–0,35	0,2–0,3	$\leq 0,03$	$\leq 0,03$

### **Гибридные подшипники с разнородными материалами тел и опор качения**

Важным шагом в производстве подшипников качения является применение конструкционных керамик. Основные свойства керамического материала – высокие прочность, твердость, коррозионная стойкость и низкая плотность, что позволяет подшипникам работать при более высоких скоростях вращения и температурах при сниженной массе. В то же время ресурс может быть повышен благодаря тепловыделению, а также снижению напряжения материалов и износа подшипников. Даже относительно небольшое уменьшение массы тел качения и вращающейся обоймы при высоких угловых скоростях существенно снижает уровень центробежных нагрузок (вибрации), что в свою очередь позволяет снижать уровни преднатяга (сборочные допуски) и в результате получить значительное преимущество по массогабаритным характеристикам узла без снижения его надежности [35].

Широкое применение при изготовлении прецизионных подшипников получили керамические материалы на основе нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). В меньшей степени используются оксидные керамики ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Нитрид кремния, применяемый для изготовления тел качения, обладает высокими усталостными свойствами, трещиностойкостью и низкой плотностью [36]. Кроме того, в работе [31] установлено, что при сухом трении величина износа тел качения из нитрида кремния меньше, чем у прочих материалов – подшипниковой стали, карбида кремния и оксида алюминия.

Подшипники, тела качения и кольца которых изготовлены из керамики, имеют крайне малое сопротивление качения, низкую плотность, повышенные коррозионную стойкость и твердость, высокие рабочие температуры и низкий абразивный износ.

В авиакосмической отрасли в специфических условиях эксплуатации, связанных с повышенными либо, наоборот, криогенными температурами, химически агрессивными средами, воздействием вакуума и излучений, высокими удельными нагрузками и скоростями (в подшипниках ГТД, турбонасосах криогенных ракетных топлив и т.д.), особые свойства конструкционных керамик могут быть реализованы наиболее полно.

Тем не менее при всех положительных свойствах керамических материалов основной проблемой их использования остаются недостаточная ударная вязкость и катастрофический характер распространения трещин в материале. Поэтому, вероятно, в обозримом будущем полностью керамические подшипники будут находить узкое и потому ограниченное применение в авиакосмической промышленности.

Компромиссным решением являются гибридные подшипники, кольца которых изготавливают из высококачественной легированной стали, а элементы качения – из керамики. В условиях недостаточной смазки или ее отсутствия при невысоких скоростях вращения, а также в условиях достаточной смазки при высоких скоростях вращения гибридные подшипники демонстрируют практически те же свойства, что и керамические. Этот тип подшипников имеет резерв для дальнейшего совершенствования как конструкции (ее оптимизации), так и материалов – сталей и керамик.

### **Заключения**

В настоящее время для изготовления подшипников специального назначения в зависимости от условий эксплуатации наиболее часто используют тепло-, коррозионностойкие и цементуемые стали, а также керамические материалы. С целью обеспечения высокой износостойкости и контактной выносливости для крупногабаритных подшипников авиационного назначения за рубежом применяют теплостойкие стали марок M50 и M50NiL. В рамках реализации программы по импортозамещению в России разработан аналог стали M50 – комплексно-легированная высокоуглеродистая сталь марки ВКС241.

Для эксплуатации в условиях агрессивных коррозионных сред в России используют коррозионностойкие стали марок 95X18 и 110X18M, за рубежом – стали марок 440В и 440С (440С Modified). Несмотря на высокую концентрацию углерода в их составе, содержание хрома в количестве 18 % (по массе) обеспечивает достаточную коррозионную стойкость при высоком уровне механических характеристик.

Актуальным направлением в разработке подшипниковых сталей является использование азота в качестве легирующего элемента, однако его введение в твердый раствор связано с рядом трудностей и требует специального оборудования. Тем не менее в современном машиностроении широкое применение нашли подшипниковые стали со сверхравновесным содержанием азота (Cronidur 30, XD15NW и N360) благодаря формированию в их структуре мелкодисперсных избыточных фаз, что снижает уровень шума и вибраций при эксплуатации подшипника качения. В России разработан аналог стали со сверхравновесным содержанием азота – сталь марки ВНС-78.

Современное развитие машиностроительной промышленности требует модернизации разработанных технологий и изделий. Одним из перспективных направлений при изготовлении подшипников является применение разнородных материалов для опор и тел качения. Гибридные подшипники, включающие стальную опору и керамические тела качения, могут работать при более высоких скоростях благодаря сниженной плотности тел качения и в условиях отсутствия смазочного материала в зоне контакта из-за высокой стойкости тела качения к износу.

**Библиографический список**

1. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
3. Спришевский А.И. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 632 с.
4. Пинегин С.В. Опоры качения в машинах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 150 с.
5. 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.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. № 3. С. 8–13.
8. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
9. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
10. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
11. Удод К.А., Трофименко Н.Н., Романенко Д.Н., Севальнев Г.С. Перспективы развития конструкционных сталей, легированных алюминием // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13.
12. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
13. Decaudin B., Djega-Mariasassou C., Cizeron G. Mise en évidence par spectrométrie Mössbauer de l'effet de traitements d'austénitisation avant trempe sur un acier semi-rapide de type 80DCV40 // *Revue de Métallurgie*. 1994. Vol. 91. No. 9. P. 1241–1241.
14. Gloeckner P. The influence of the raceway curvature ratio on power loss and temperature of a high speed jet engine ball bearing // *Tribology transactions*. 2013. Vol. 56. No. 1. P. 27–32.
15. Прутки из теплостойкой подшипниковой стали марки 8X5M3ВФБ-ИШ (ВКС241-ИШ) и 8X5M3ВФБ-ИД (ВКС241-ИД) // *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов: офиц. сайт*. URL: <https://catalog.viam.ru/catalog/8kh5m3vfb-vks241> (дата обращения: 07.07.2021).
16. Ooi S., Bhadeshia H.K.D.H. Duplex Hardening of steels for Aeroengine Bearings // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. No. 11. P. 1927–1934.
17. Теплостойкая подшипниковая сталь: пат. 2447183 Рос. Федерация. № 2011112950/0; заявл. 05.04.11; опубл. 10.04.12.
18. Rabitsch R., Koch F., Würzinger P. M50 (AMS 6191) and M50NiL (AMS 6278) High-Performance VIM-VAR Melted Bearing Steels for the Aviation Industry // *Proceedings of the 2005 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting*. 2005. Vol. 5. P. 57–64.
19. Beswick J.M. Bearing steel technology. ASTM International, 2002. 533 p.
20. Свяжин А.Г., Капуткина Л.М. Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. № 62 (3). С. 173–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-173-187.
21. Свяжин А.Г., Капуткина Л.М. Стали, легированные азотом // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2005. № 10. С. 36–46.
22. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Изд-во проф. Марин Дринов, 1995. 272 с.

23. Гаврилюк В.Г., Ефименко С.П. Влияние азота на структуру и свойства  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа и перспективные направления разработки высокоазотистых сталей // Труды I Всесоюз. конф. «Высокоазотистые стали». Киев, 1990. С. 5–26.
24. Berns H., Escher C., Streich W.D. Martensitic high nitrogen steel for applications at elevated temperature // Materials science forum. Transaction Technical Publications Ltd., 1999. Vol. 318. P. 443–448.
25. Berns H., Ehrhardt R. Carbon or nitrogen alloyed quenched and tempered stainless steel – comparative study // Steel Research. 1996. Vol. 67. No. 8. P. 343–349.
26. Stein G., Hucklenbroich I., Wagner M. P 2000-A new austenitic high nitrogen steel for power generating equipment // Materials science forum. Transaction Technical Publications Ltd., 1999. Vol. 318. P. 167–174.
27. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В., Крылов С.А., Тонышева О.А. Разработка и исследование высокопрочной коррозионностойкой стали для деталей подшипников // Металлург. 2019. № 11. С. 39–44.
28. Cronidur 30 Stainless Steel // PASU (Progressivealloy): офиц. сайт. URL: <https://www.progressivealloy.com/cronidur-30-stainless-steel> (дата обращения: 07.07.2021).
29. Trojahn W., Streit E., Chin H., Ehlert D. Progress in bearing performance of advanced nitrogen alloys stainless steel, Cronidur 30 // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe. 1999. Vol. 30. No. 10. P. 605–611.
30. Berns H., Ebert F.-J., Zoch H.-W. The new low nitrogen steel LNS – a material for advanced aircraft engine and aerospace bearing applications // Bearing steels: into the 21-st century. ASTM International, 1998. 440 p.
31. Wang F., Li Q., Zheng L. et al. Microstructure and corrosion characterization of Cr Film on Carburized CSS-42L Aerospace bearing steel by filtered cathodic vacuum arc deposition // Coatings. 2018. Vol. 8. No. 9. P. 313.
32. Martensitic stainless steels XD15NW // AUBERT & DUVAL: офиц. сайт. URL: <https://www.aubertduval.com/alloy/768> (дата обращения: 07.07.2021).
33. BÖHLER N360 // BÖHLER: офиц. сайт. URL: <https://www.boehler-edelstahl.com/en/products/n360> (дата обращения: 07.07.2021).
34. Высокопрочная коррозионностойкая сталь: пат. 2725766 Рос. Федерация. № 2724766/C1; заявл. 23.05.19; опубл. 25.06.20.
35. Ножницкий Ю.А., Петров Н.И., Лавтрентьев Ю.Л. Гибридные подшипники качения для авиационных двигателей (обзор) // Авиационные двигатели. 2019. № 2 (3). С. 63–76.
36. Kim S.S., Kato K., Hokkirigawa K., Abe H. Wear Mechanism of Ceramic Materials in Dry rolling Friction // Transaction of the ASME. 1986. Vol. 108. P. 522–526.