

УДК 669.15

В.И. Громов¹, Н.А. Курьякова¹, Е.Н. Коробова¹, О.В. Седов¹**НОВАЯ ТЕПЛОСТОЙКАЯ СТАЛЬ
ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23

Рассмотрены принципы легирования новой подшипниковой стали, проанализировано влияние неметаллических включений на работоспособность подшипников, исследована карбидная неоднородность в полуфабрикатах (прутках) разного сортамента и рассмотрены методы ее снижения. Проведен сравнительный анализ карбидной неоднородности полуфабрикатов из новой подшипниковой стали с полуфабрикатами того же размера из отечественного аналога – сплава ЭИ347. Показано влияние упрочняющей термической обработки стали на прочность, твердость и теплостойкость.

Ключевые слова: *теплостойкость, подшипники, карбидная неоднородность, микроструктура, твердость, прочность, легирующие элементы, выплавка, горячая пластическая деформация, термическая обработка.*

V.I. Gromov¹, N.A. Kurpyakova¹, E.N. Korobova¹, O.V. Sedov¹**NEW HEAT RESISTANT STEEL FOR AIRCRAFT BEARINGS**

The article discusses the principles of alloying of new bearing steel, analyzes the effect of non-metallic inclusions on the performance of bearings, studies carbide heterogeneity in semi-finished products (rods) of different grades and considers methods for reducing it. A comparative analysis of the carbide heterogeneity of semi-finished products from new bearing steel with semi-finished products of the same size from the domestic equivalent of EI347 was carried out. The effect of hardening heat treatment of steel on strength, hardness and heat resistance is shown.

Keywords: *heat resistance, bearings, carbide heterogeneity, microstructure, hardness, strength, alloying elements, smelting, hot plastic deformation, heat treatment.*

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 теплостойких сталей для авиационных подшипников – одна из важнейших задач современного материаловедения. Во ФГУП «ВИАМ» исследования по разработке составов, технологий производства полуфабрикатов и термической обработки теплостойких подшипниковых сталей проводятся в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–4].

В авиационной технике подшипники работают в сложных условиях. В зоне контакта тел качения и колец подшипников в результате многократно повторяющегося нагружения возникают высокие контактные нагрузки, приводящие к интенсивному изнашиванию. Кроме того, детали испытывают знакопеременные и ударно-вибрационные нагрузки, воздействие коррозионных сред и повышенных температур. Для обеспечения

высокой работоспособности и надежности авиационных подшипников, стали, из которых изготавливаются тела качения и кольца, должны иметь:

- высокую прочность и сопротивление пластической деформации;
- высокую износостойкость, которая определяется твердостью, а также количеством и формой специальных карбидов;
- высокое контактное сопротивление усталости, которое зависит от микроструктуры стали и карбидной однородности;
- размерную стабильность;
- хорошую прокаливаемость [5–7].

Подшипниковые стали классифицируются по условиям работы. Различают стали общего назначения, используемые для изготовления деталей подшипников, работающих при температурах от -60 до $+300^{\circ}\text{C}$ в неагрессивных средах, и стали специального назначения для изготовления теплостойких и коррозионностойких подшипников [8].

Опыт изготовления полуфабрикатов из подшипниковых сталей показывает, что для получения повышенного комплекса механических свойств необходимо:

- использование металла высокого качества по газонасыщенности (N_2 , O_2 , H_2), чистоте по неметаллическим включениям, отсутствию вредных примесей (As , Pb , Sn), в связи с чем выплавка сталей должна проводиться с применением вакуумных технологий;
- при горячем переделе металла степень его деформации (проработки) должна быть максимально возможной;
- термическая обработка деталей подшипников должна проводиться на специализированном оборудовании, обеспечивающем точное поддержание температуры и исключая обезуглероживание поверхности.

Для изготовления теплостойких подшипников, работающих в условиях смазки при температуре $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$, а в экстремальных ситуациях – до 500°C , применяют дисперсионно-твердеющие стали, разработанные на основе инструментальных быстрорежущих сталей. За рубежом в основном применяется сталь марки M50, разработанная в США фирмой General Electric Company, которая по способу термической обработки относится к сталям с дисперсионно-карбидным упрочнением. Сталь марки M50 зарекомендовала себя как материал с высокой долговечностью, что объясняется однородностью структуры и отсутствием крупных карбидных включений, негативно влияющих на контактную выносливость. Химический состав стали M50 взят за основу для разработки теплостойких подшипниковых сталей и в других странах. Так, во Франции – это сталь марки 80DCV40, в Германии – марки 80MoCrV4216.

В России для изготовления теплостойких авиационных подшипников используют сталь ЭИ347 (8X4B9Ф2-Ш), которая обладает высокой прочностью и хорошей твердостью (не ниже 56 HRC) при работе в условиях – до 500°C [8]. Однако в отличие от стали M50, сталь ЭИ347 имеет большую карбидную неоднородность, что объясняется присутствием в ее составе вольфрама, образующего крупные скопления нерастворимых при нагревах (вплоть до температур плавления) карбидов, которые являются очагами выкрашивания рабочей поверхности подшипников в процессе эксплуатации. Кроме того, крупные сегрегации нерастворимых карбидов при производстве полуфабрикатов из стали ЭИ347 существенно усложняют процессковки и исключают прокатку.

Химический состав сталей, чаще всего применяемых для изготовления деталей подшипников, представлен в табл. 1 [8].

Таблица 1

Химический состав сталей для изготовления подшипников качения

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)										
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu	Mo	W	V
	не более										
M50	0,77–0,85	≤0,25	≤0,35	3,75–4,25	0,015	0,015	0,1	–	4,0–4,5	–	0,9–1,1
ЭИ347	0,70–0,80	≤0,25	≤0,25	4,0–4,6	0,030	0,015	0,35	0,25	≤0,80	8,5–9,5	1,4–1,7
80DCV40	0,77–0,85	0,1–0,4	0,1–0,4	3,75–4,5	0,015	0,015	0,2	0,2	3,75–4,5	0,25	0,9–1,2
80MoCrV4216	0,77–0,85	≤0,25	≤0,35	3,75–4,25	0,015	0,015	0,1	–	4,0–4,5	–	0,9–1,1

Следует отметить, что за рубежом, несмотря на разнообразие разработанных подшипниковых сталей, основным материалом для изготовления авиационных подшипников является сталь M50 и цементуемая сталь марки M50Ni1.

Для производства конкурентоспособных теплостойких отечественных подшипников во ФГУП «ВИАМ» создана новая теплостойкая подшипниковая сталь, не уступающая по свойствам стали M50 и превосходящая по карбидной однородности сталь ЭИ347. В табл. 2 приведены сравнительные свойства вышеперечисленных сталей.

Таблица 2

Сравнительные свойства теплостойких подшипниковых сталей

Свойства	Значения свойств для сталей		
	новой подшипниковой	ЭИ347 (Россия)	M50 (США)
Предел прочности при растяжении, МПа	2270–2340	2100	–
Теплостойкость, °С	500	500	500
Предел выносливости σ_{-1} , МПа	650 (на базе $2 \cdot 10^7$ циклов)	650 (на базе 10^7 циклов)	–
Ударная вязкость KCU, Дж/см ²	≥5	2	>5
Плотность, кг/м ³	7890	8300	–
Твердость HRC	61–63	≥60	≥60
Технологичность полуфабриката	Прокатка	Ковка	Прокатка

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.3. «Высокопрочные наноструктурированные конструкционные стали и диффузионные покрытия, получаемые методами химико-термической обработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Для исследования механических свойств и микроструктуры новой стали использовали образцы, изготовленные из слитков, поковок (заготовок) и прутков в состоянии до и после термической обработки. Определение химического состава стали проводили в соответствии с ГОСТ Р 55079–2012, ГОСТ 12344–2003 и ГОСТ 12345–2001 на оборудовании фирмы Лесо. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51, оснащённом фотокамерой и программой анализа изображений Analysis в соответствии с ГОСТ 8233–56, ГОСТ 1778–70, ГОСТ 5950–2000 и ГОСТ 5639–82 на металлографических шлифах после травления в 4%-ном спиртовом растворе HNO₃. Измерение твердости осуществляли на твердомере DuraVision 300 по ГОСТ 9013–59 по методу Роквелла, определение механических свойств – в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9454–78 и ГОСТ 25.502–79 на испытательном оборудовании фирмы Walter+Bai.

Результаты и обсуждение

Состав новой теплостойкой подшипниковой стали разработан на основании опыта ФГУП «ВИАМ» по созданию теплостойких дисперсионно-твердеющих цементуемых сталей и изучения тенденций легирования теплостойких подшипниковых сталей.

Выбрана система легирования, повышающая технологичность стали при пластической деформации и упрочнении. При высоком содержании углерода варьировали содержание основных карбидообразующих элементов: Cr, Mo, W, V, обеспечивающих вторичную твердость стали при отпуске.

Эффект упрочнения при вторичном твердении обусловлен выделением дисперсных карбидов, таких как Me_7C_3 , $Me_{23}C_6$ (на базе хрома), Me_2C (молибдена) и MeC (ванадия), а также основного карбида теплостойких сталей M_6C (на базе вольфрама и молибдена). Карбид M_6C , в котором присутствуют вольфрам и молибден одновременно, в отличие от карбида, где присутствует только вольфрам, имеет меньшие размеры и растворяется при более низких температурах, что благоприятно для снижения балла карбидной неоднородности [8]. В связи с этим при выборе системы легирования в состав стали вводили молибден и вольфрам в различных соотношениях. Для обеспечения мелкозернистой структуры в сталь вводили также ниобий и тантал, которые образуют устойчивые карбиды (NbC , TaC), практически не растворимые в аустените, и являются дополнительными центрами кристаллизации, сдерживающими рост зерна при нагреве под закалку, что положительно влияет на сопротивление хрупкому разрушению и одновременно способствует упрочнению.

Определили также влияние некарбидообразующих элементов (Ni, Mn и Si) на процессы упрочнения и технологичность стали. Никель увеличивает устойчивость аустенита, из которого при отпуске выделяются субмелкодисперсные спецкарбиды, но при содержании $>0,4\%$ (по массе) никель затрудняет получение при отжиге твердости ≤ 30 HRC, необходимой для дальнейшей механической обработки полуфабрикатов.

Марганец и кремний использовали как раскислители. Кроме того, кремний вводился как элемент, оказывающий положительное влияние на повышение твердости при дисперсионном твердении в процессе отпуска. Однако его содержание было ограничено, так как известно, что при содержании $>0,5\%$ (по массе) кремний затрудняет горячую пластическую деформацию, препятствует росту карбидов при отпуске и сдвигает процессы отпуска в сторону более высоких температур.

Содержание углерода варьировали в пределах от 0,7 до 1,0% (по массе). Исследования показали, что количество углерода $>0,85\%$ (по массе) недопустимо, поскольку в литой микроструктуре слитков обнаружены зернограницные фрагменты эвтектической кристаллизации карбидов. Наличие таких структурных составляющих нежелательно, так как они нерастворимы при нагреве до температурыковки и тем более до температуры нагрева под закалку.

Выбранная система легирования позволила длительно обеспечить теплостойкость новой стали до 500°C (твердость 61–63 HRC). Необходимо отметить, что разработанная сталь содержит значительно меньшее количество дорогого легирующего элемента вольфрама в сравнении с российским аналогом – сталью ЭИ347 (1 вместо 9% (по массе)), и на 1% (по массе) меньше молибдена, чем зарубежный аналог – сталь M50.

В виду того, что работоспособность подшипников определяет сопротивление усталости материалов в зоне контакта элементов качения, при разработке технологии изготовления полуфабрикатов большое внимание уделено обеспечению чистоты металла по неметаллическим включениям (особенно сульфидным и оксидным) и карбидной неоднородности: сетке карбидов, строчечным включениям, наличию угловатых карбидов. При наличии большого количества вышеперечисленных включений в процессе передела полуфабрикатов и термической обработки изделий, вследствие различия температурных

коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) металла и включений, возникают микронапряжения противоположных знаков. При деформационных нагрузках (прокатка,ковка, знакопеременные нагрузки в процессе эксплуатации) неметаллические включения выступают в качестве концентраторов напряжений, а также являются барьером, где скапливаются дислокации. Эти скопления могут стать началом трещин и последующего контактно-усталостного разрушения подшипника [9–11].

Для обеспечения чистоты металла выплавку стали проводили в вакуумно-индукционной печи с последующим вакуумно-дуговым переплавом. В результате чего достигнуто существенное уменьшение загрязненности металла неметаллическими включениями (до 1 балла по ГОСТ 1778–70).

Исследования карбидной неоднородности полуфабрикатов выбранного состава из новой подшипниковой стали проводили на продольных микрошлифах после термической обработки (заковки и высокого отпуска). Как видно из рис. 1, карбиды в прутках из новой стали диаметром 100 мм располагаются в виде узких полос с остатками сильнодеформированной разорванной сетки, что соответствует 5–6 баллу шкалы ГОСТ 5950–2000. Карбиды внутри полос раздробленные. Увеличение степени обжата при горячей пластической деформации стали с получением прутков диаметром 55 мм снижает карбидную неоднородность стали до 2–3 балла. Карбиды располагаются в направлении прокатки в виде разорванных полос. В прутках диаметром 10 мм карбидная фаза располагается равномерно и соответствует 1 баллу. Угловатые карбиды не обнаружены ни в одном сорте. Таким образом, с увеличением диаметра проката повышается балл карбидной неоднородности, что объясняется меньшим обжатием слитка.

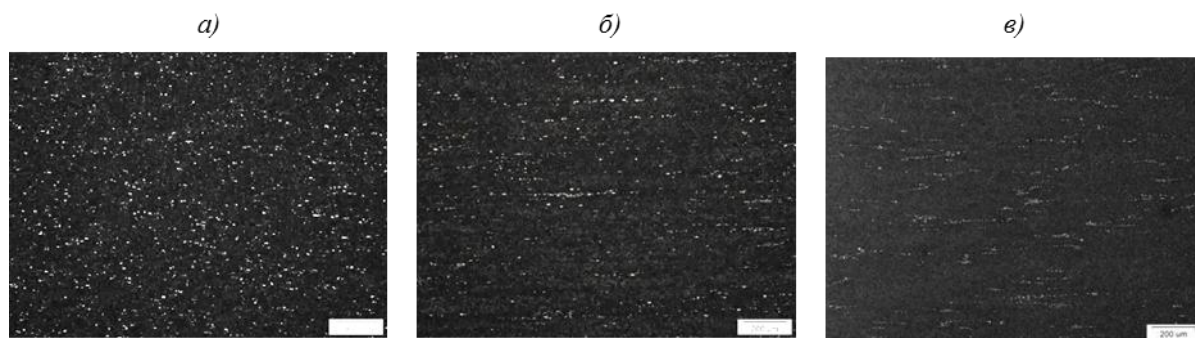


Рис. 1. Карбидная неоднородность ($\times 100$) прутков из новой подшипниковой стали диаметром 10 (а), 55 (б) и 100 мм (в)

В связи с этим, помимо оптимизации состава подшипниковой стали, одним из эффективных методов уменьшения карбидной неоднородности является применение для изготовления полуфабрикатов из подшипниковой стали слитков большой массы, поскольку для стали, используемой в виде полуфабрикатов крупного профиля, необходимо достичь степени деформации, достаточной для существенного улучшения условий распределения карбидов. Однако увеличение массы слитка усиливает ликвацию и центральную пористость, поэтому это целесообразно до определенных пределов [9, 12]. На основании проведенного анализа и опыта работы для получения прутков новой теплостойкой подшипниковой стали диаметром до 100 мм с минимальной карбидной неоднородностью выбрана оптимальная масса слитка 600–700 кг.

Сравнение полуфабрикатов из новой стали с полуфабрикатами того же размера из стали ЭИ347 показывает, что распределение карбидной фазы выгодно отличается по строению, количеству и характеру расположения карбидов от распределения карбидной фазы в стали ЭИ347. Так, в структуре прутков из стали ЭИ347 диаметром 100 мм наблюдается деформированная сетка эвтектических карбидов со скоплениями, разорванная в отдельных местах, что соответствует 7–8 баллу по шкале ГОСТ 5950–2000,

аналогичный полуфабрикат из новой стали имеет 5–6 балл (рис. 2). Кроме того, в стали ЭИ347, вследствие присутствия в составе повышенного количества вольфрама (9% (по массе)), размер карбидных включений превосходит размер карбидов в новой стали. В микроструктуре стали ЭИ347 присутствуют крупные карбиды угловатой формы, которые снижают контактную долговечность материала. В составе разработанной стали карбиды угловатой формы отсутствуют по причине того, что часть вольфрама заменена на молибден. Молибден и вольфрам замещают друг друга в карбиде в соотношении, равном их содержанию в стали. Такие карбиды обладают значительно меньшей способностью к образованию угловатой формы. Кроме того, имеют меньшие размеры и растворяются при более низких температурах [9].

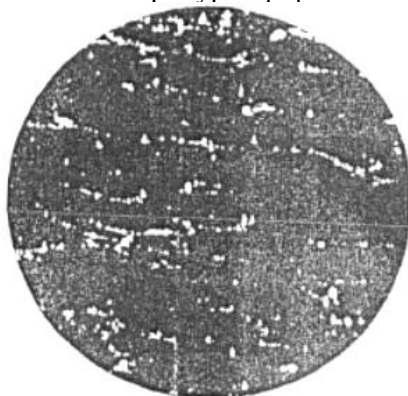


Рис. 2. Карбидная неоднородность ($\times 100$) прутков из стали ЭИ347 диаметром 100 мм

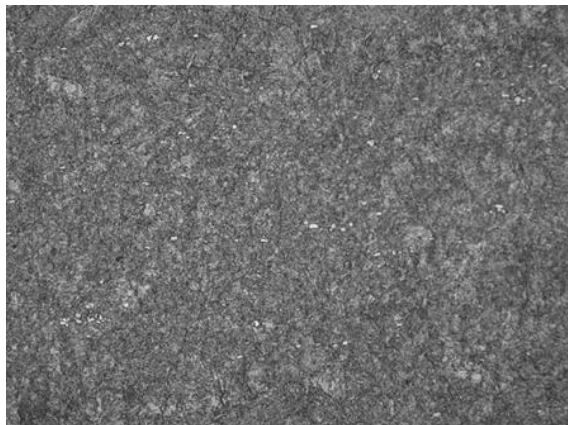


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) образцов прутков диаметром 55 мм из новой подшипниковой стали после упрочняющей термической обработки

В технологию упрочнения теплостойкой стали для подшипников заложены процессы, протекающие при термической обработке быстрорежущих сталей, – это предельно возможное растворение карбидов при нагреве под закалку и перевод в твердый раствор (аустенит) углерода и карбидообразующих элементов. При последующих отпусках происходит выделение субмелкодисперсных карбидов по всему объему зерна, обеспечивающих дисперсионное твердение стали с повышением теплостойкости [9, 13, 14]. Таким образом, упрочняющая термическая обработка новой теплостойкой стали для подшипников обеспечивает в изделиях формирование равномерной мелкозернистой структуры (10 балл) мартенсита отпуска с избыточными карбидами (рис. 3), при которой достигаются высокие значения предела прочности при растяжении $\sigma_b=2270\text{--}2340$ МПа, твердости 61–63 HRC и теплостойкости 500°C. Содержание остаточного аустенита в микроструктуре стали составляет $\leq 2\%$, тем самым обеспечивается размерная стабильность, что особенно важно для подшипников, установленных в ответственных узлах изделия [15, 16].

Заключения

Во ФГУП «ВИАМ» разработана новая теплостойкая подшипниковая сталь, не уступающая по эксплуатационным характеристикам зарубежному аналогу марки M50 и превосходящая по карбидной однородности и технологичности при горячей пластической деформации отечественную сталь марки ЭИ347.

Применение новой теплостойкой подшипниковой стали для перспективных самолетов и вертолетов взамен стали ЭИ347 позволит повысить контактно-усталостную прочность, надежность и ресурс работы теплостойких подшипников путем повышения чистоты металла и снижения балла карбидной неоднородности. Кроме того, при производстве полуфабрикатов из стали наряду с ковкой возможно применять технологию раскатки, тем самым снизив трудоемкость производства.

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. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России // Сб. научно-информационных материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. 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.
6. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
7. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тонышева 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.
8. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
9. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
10. 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.
11. Шпис Х.И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. М.: Металлургия, 1971. 122 с.
12. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
13. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963. 340 с.
14. Контер Л.Я. Стали для теплостойких подшипников (обзор). М.: НИИНАвтопром, 1978. Сер.: XII. 78 с.
15. Громов В.И., Кротов В.Н., Курпякова Н.А., Седов О.В., Дорошенко А.В. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства диффузионного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-3-8.
16. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974. 255 с.