

УДК 621.822.1+621.83.06
EDN: NFJQGG

Р.В. Кузнецов
ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Россия

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ УНИФИКАЦИИ СУДОВЫХ РЕДУКТОРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Объект и цель научной работы. Одной из актуальных конструкторско-технологических задач при освоении новых изделий в сфере судового машиностроения является унификация крупногабаритных подшипников скольжения судовой трансмиссии.

Материалы и методы. Несмотря на различные компоновочные решения и уникальность технических проектов в большинстве «тяжелых» редукторных комплексов в качестве подшипников скольжения применены идентичные неразъемные биметаллические вкладыши с диапазоном внутреннего рабочего диаметра 150–530 мм. В качестве материала основы используются поковки из стали 20 (ГОСТ 1050-2013), материала рабочего слоя – баббит марки Б83 (ГОСТ 1320-74). Типовая технология получения биметаллической заготовки – литейное плакирование методом горизонтальной центробежной заливки.

Основные результаты. В работе представлены результаты исследования механических свойств, химического состава, фраттографического и металлографического анализа материалов опытных биметаллических подшипниковых узлов для корпусных конструкций судового машиностроения. Приведены сортамент материалов и типовая технология получения унифицированных биметаллических заготовок антифрикционного назначения. Выполнен анализ вероятных причин частичного разрушения плакирующего слоя подшипников в процессе их стендовых испытаний в составе редукторного комплекса. Предложены мероприятия, направленные на повышение ресурса и работоспособности высоконагруженных биметаллических подшипников, применяемых в современных отечественных корабельных редукторных агрегатах.

Заключение. Проведенные исследования позволили оценить негативное влияние внутренних напряжений материала заготовки на эксплуатационные свойства высоконагруженных судовых подшипников скольжения. Тем самым показана необходимость ужесточения требований конструкторской документации в части состояния поставки и сортамента исходной заготовки.

Ключевые слова: редукторная передача, биметалл, технология судостроения, подшипник, баббит, фраттографический анализ.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.822.1+621.83.06
EDN: NFJQGG

R.V. Kuznetsov
PAO Zvezda, St. Petersburg, Russia

SOME UNIFICATION ISSUES OF SHIP REDUCTION GEARS

Object and purpose of research. One of the key engineering issues in production of new ship machinery is unification of large plain bearings in ship transmission systems.

Materials and methods. Most of the heavy reduction gear systems use identical one-piece bimetal shells with a range of inner working diameter 150 to 530 mm as plain bearings in spite of innovative arrangements and unique projects. Backing

Для цитирования: Кузнецов Р.В. Некоторые проблемы унификации судовых редукторных передач. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 101–108.

For citations: Kuznetsov R.V. Some unification issues of ship reduction gears. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 101–108 (in Russian).

material is steel 20 forgings (GOST 1050-2013), working layer material is Babbitt metal grade B83 (GOST 1320-74). Bimetal blanks are typically made by cladding using horizontal centrifuging process.

Main results. The paper presents investigations of mechanical properties, chemical composition, results of fractographic and metallographic analysis obtained for materials of experimental bimetal bearing units for shipboard machinery. Grades of materials and typical processes for producing bimetal blanks for antifriction applications are identified. Potential causes of cladding layers being partly damaged in bearings during test-bed trials of reduction gear installations are analyzed. Measures are suggested to extend the lifetime and improve the performance of highly loaded bimetal bearings used in modern shipboard geared installations in Russia.

Conclusion. The studies have made it possible to assess negative effects of internal stresses in the material of blanks on service characteristics of highly-loaded marine plain bearings. Therefore it is indicated that requirements regarding delivery conditions and blank grades shall be tightened.

Keywords: reduction gear, bimetal, shipbuilding processes, bearing, Babbitt, fractographic analysis.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Одним из приоритетных направлений развития отечественного судостроения текущего десятилетия является создание крупнотоннажных судов надводного флота различного назначения [1].

Реализация задач подобного масштаба требует принципиально новых решений в области технологии отечественного судостроения, одним из которых можно считать унификацию отдельных базовых элементов ГЭУ корабля. Однако выдвинутая концепция глубокой унификации «один тип газотурбинного форсажного двигателя, один тип маршевого дизельного двигателя, работающих на унифицированный главный редуктор и один тип дизель-генератора» [2] на практике формализована не в полном объеме. Достаточное количество трудов последних лет по проблематике и перспективам корабельной энергетики широко освещает состояние вопроса в области развития газотурбинных и дизельных двигателей [3–5], однако практически не затрагивает вопрос создания облика унифицированного редукторного агрегата [5, 6].

Немногочисленные работы в этом направлении ведутся на базе Санкт-Петербургского ПАО «Звезда», которое имеет богатый опыт создания как отдельных реверс-редукторных агрегатов типа РРД12000 и РП6000, так и межредукторных передач в составе звездообразных дизельных двигателей семейства М500. В данный момент предприятие значительно расширяет компетенции в части проектирования и изготовления новых редукторных комплексов различного типоразмера, в т.ч. для корабельных ГТД М90ФР, М70ФРУ, М70ФРУ-Р, М70ФРУ-2 и М75РУ.

Одной из актуальных конструкторско-технологических задач при освоении новых изделий яв-

ляется унификация крупногабаритных подшипников скольжения судовой трансмиссии. Однако детальные предварительные расчеты, в т.ч. с применением технологии цифровых двойников на стадии технического проекта, не всегда позволяют получить гарантированный запас прочности на опытных подшипниковых узлах. Одним из подобных примеров стал выход из строя ряда биметаллических подшипников в процессе стендовых испытаний редукторного комплекса, изготовленного в рамках ОКР проекта 6РП.

Целями данной работы являются использование современных методик металлографического, фрактографического и химического анализа, а также испытаний механических свойств материалов для определения вероятных причин разрушения биметаллических подшипников судовой трансмиссии в процессе эксплуатации и разработка мероприятий по повышению их работоспособности и долговечности.

Материалы и методы

Materials and methods

Несмотря на различные компоновочные решения и уникальность технических проектов в большинстве «тяжелых» редукторных комплексов в качестве подшипников скольжения применены идентичные неразъемные биметаллические вкладыши с диапазоном внутреннего рабочего диаметра 150÷530 мм. В качестве материала основы используются поковки из стали 20 (ГОСТ 1050-2013), материала рабочего слоя – баббит марки Б83 (ГОСТ 1320-74). Типовая технология получения биметаллической заготовки – литейное плакирование методом горизонтальной центробежной заливки.

Стоит отметить, что для рассматриваемых в данной работе подшипников окружная скорость

на номинальном режиме составляет от 22 до 26 м/с, за исключением входного (45 м/с) и выходного (6,6 м/с) подшипников. Таким образом, все применяемые подшипники (кроме выходного) относятся к высокоскоростным.

Поскольку для высокоскоростных подшипников нельзя исключить возникновение неустойчивости движения центра вала относительно подшипника, а соответствующие расчеты не обеспечиваются ГОСТ ИСО 7902 и являются сложной научной задачей, рекомендуется экспериментальная проверка устойчивости работы подшипников на эксплуатационных режимах. Особенно важна проверка устойчивости работы входных подшипников редуктора.

Так, в процессе предварительных стендовых испытаний опытного образца судовой трансмиссии при наработке 170 ч был выявлен локальный перегрев подшипников входного вала ведущей шестерни на зеркальных редукторах левого и правого бортов. Продолжение испытаний по утвержденной программе-методике привело к аварийному останову на 206-м часе работы с последующей разборкой и дефектацией редукторов.

При визуальном обследовании деталей подшипников на рабочих поверхностях были зафиксированы механические повреждения в виде неравномерно расположенных задиров, трещин и отколов баббита (рис. 1).

Интенсивность повреждений различалась вследствие ресурса испытаний. Но общим являлись локальные дефекты в форме трещин и отколов, сосредоточенных в локальных полосах шириной до 50 мм вблизи одного из краев. Месторасположение и протяженность окружных трещин (рис. 2), зафиксированных на поверхности подшипника после длительных испытаний, вероятнее всего являются аналогами микроканалов, через которые реализовывалась смазка вращающихся контртел.

На рабочих поверхностях других подшипников такие дефекты выявлены не были. По согласованию



Рис. 1. Механические повреждения рабочих поверхностей в подшипниках входного вала

Fig. 1. Mechanical damage of working surfaces in input shaft bearings

с производителями биметаллических заготовок подшипников назначены места отбора характерных проб для проведения исследований по определению вероятной причины разрушения деталей.

В качестве объекта исследования выступали два фрагмента из детали редуктора левого борта размером 30×70×100 мм, отобранные для фрактографического исследования. Классификацию по-

Рис. 2. Окружная трещина на поверхности подшипника после длительных испытаний

Fig. 2. Circumferential crack on bearing surface after long-term tests



вреждений и определение вероятных причин их появления производили методом фрактографического анализа в соответствии с требованиями РД 50-672 «Классификация видов изломов металлов». В качестве испытательного оборудования применяли световой стереомикроскоп Discovery. Анализ микроstructures материалов проводили с помощью металлографического микроскопа МИМ-9 с использованием цифровой фотокамеры.

Для исследования химического состава и механических свойств опытных деталей использовали специально подготовленные образцы, изготовленные из разрушенного (образец № 1) и неповрежденного (образец № 2) подшипников редуктора левого борта. Химический анализ материала основы и плакирующего слоя определяли методом спектрального анализа с помощью оптико-эмиссионного спектрометра ДФС-500. Механические свойства материала основы исследовали с помощью гидравлической испытательной установки Losenhausen в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и ГОСТ P58527-2019. Твердость рабочего слоя баббита измеряли методом Бриннеля (ГОСТ 9012-55) в пяти точках каждого образца с последующим усреднением результатов измерений.

Результаты исследований

The results of the study

Анализ результатов исследования химического состава как стальной основы, так и баббитовой наплавки не выявил отклонений от нормативных значений ГОСТ.

Исходя из анализа результатов металлографических исследований выявлено, что микроstructure стали 20 у исследуемых образцов имеет существенные различия. Микроstructure образца № 1 (рис. 3а) состоит из зерен феррита и перлита и соответствует состоянию отожженной стали, что говорит о ее неполной перекристаллизации. Образец № 2 (рис. 3б) имеет однородную микроstructure, состоящую из феррита и перлита, характерную для термически обработанной стали, прошедшей нормализацию и высокий отпуск. Данные выводы нашли подтверждение при анализе результатов исследования механических свойств (табл.). Таким образом, можно говорить, что материал подшипника образца № 1 не соответствует требованиям, предъявляемым к заготовкам-поковкам в состоянии поставки согласно ГОСТ 8479-70.

Завершающим этапом исследования являлся визуальный и фрактографический анализ. При рас-

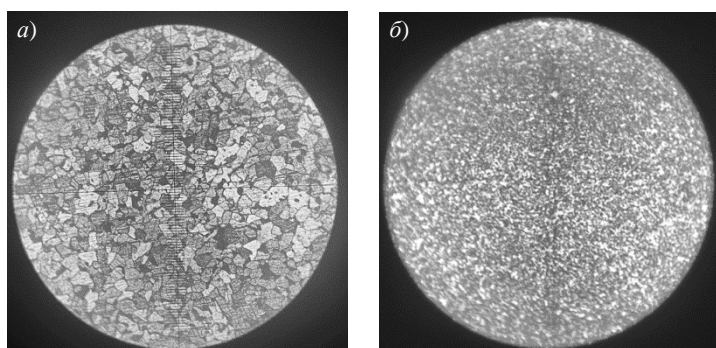


Рис. 3. Микроstructure материала основы:
 а) разрушенного подшипника;
 б) неповрежденного подшипника, $\times 200$

Fig. 3. Microstructure of backing material:
 a) damaged bearing;
 b) intact bearing, $\times 200$

Таблица. Результаты исследования механических свойств материала основы подшипников редуктора левого борта

Table. Investigation of backing material mechanical properties for bearings of portside reduction gear

	Предел текучести σ_T , кгс/мм ²	Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Обр. № 1	209	357	18	45,5
Обр. № 2	289	435	32	60,1
Требование ГОСТ 1050-2013 для ст. 20	245	410	25	55

смотрении поверхностей разрушения в представленных фрагментах установлено, что повреждения типичны для всех осмотренных деталей, поэтому они рассматриваются как представительные. Зафиксировано, что повреждения расположены неравномерно на рабочих поверхностях. Трещины и отколы сосредоточены на одной стороне рабочей поверхности детали в пределах полосы 50 мм, а задиры – на противоположной стороне, также в полосе ~40 мм.

Местоположения выявленных повреждений указывают на неравномерное распределение нагрузки со стороны контртела и наличие твердых частиц, инициировавших образование задиров.

Распределение нагрузки обусловлено геометрическими параметрами сопряженных деталей в подшипнике и качеством сборки всей конструкции.

Замечено, что в полосе повреждения доминируют два типа раскрытия трещин: трещины отрыва, перпендикулярные направлению движения контртела, и трещины сдвига, ориентированные под углом ~45° к направлению движения. Ширина раскрытия определяется интенсивностью действующих напряжений $\sigma_{i=1,2,3}$ и τ_{max} (рис. 4).

Приведенные данные позволяют полагать, что раскрытие дефектов обусловлено высокими напряжениями сжатия и актами деформации в слое баббита.

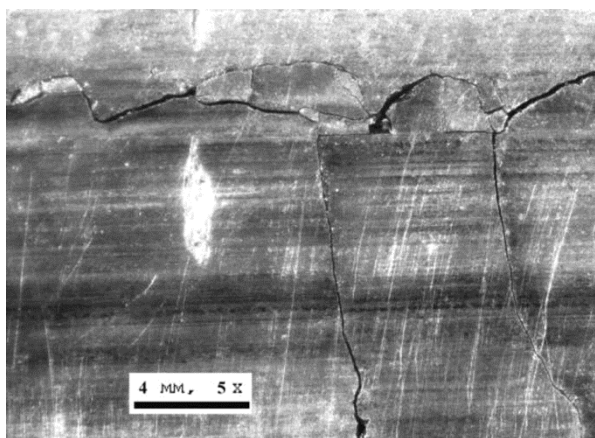
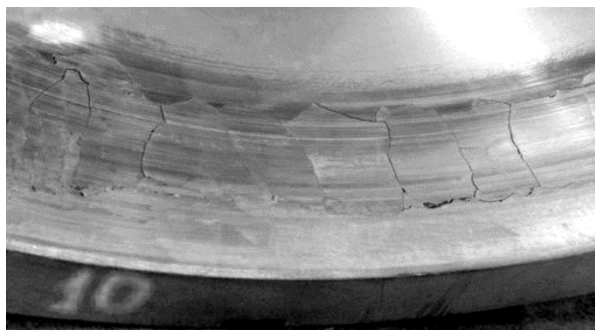
Зафиксировано, что трещины отрыва и сдвига чередуются квазипериодически. Данный факт позволяет полагать, что чрезмерная нагрузка со стороны контртела реализована периодически, т.е. повреждение конструкции осуществлялось в процессе испытаний.

Высказанное положение косвенно подтверждается микрорельефом на участках поврежденной поверхности, где выявлены локальные очаги разрушения и концентрические дуги вследствие останова фронта трещины (рис. 5).

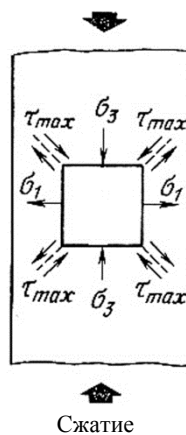
При рассмотрении поперечных сечений слоев баббита, расположенных в зонах повреждения деталей, замечены трещины отрыва как «ответные» акты разгрузки растяжением. Заметим, что баббит – антифрикционный литейный сплав на основе олова, с добавлением меди, свинца, сурьмы и других легирующих компонентов, предназначенный для использования в виде слоя, залитого в корпус вкладыша подшипника скольжения. В состав баббитов могут входить кадмий, теллур, кальций, натрий, магний.

Выявленная особенность позволяет предположить, что квазипериодические нагрузки сжатием по

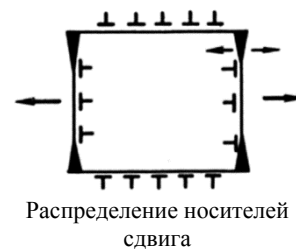
величине превышали силы сцепления слоя баббита с подложкой (~10÷20 МПа).



а)



Сжатие



Распределение носителей сдвига

б)

Рис. 4. Квазипериодическое чередование трещин сдвига и отрыва (а) и схема действия напряжений и распределения носителей сдвига – дислокаций (б)

Fig. 4. Quasi-periodical alteration of shear and separation cracks (a) and diagram of acting stresses and shear and dislocation distributions (b)

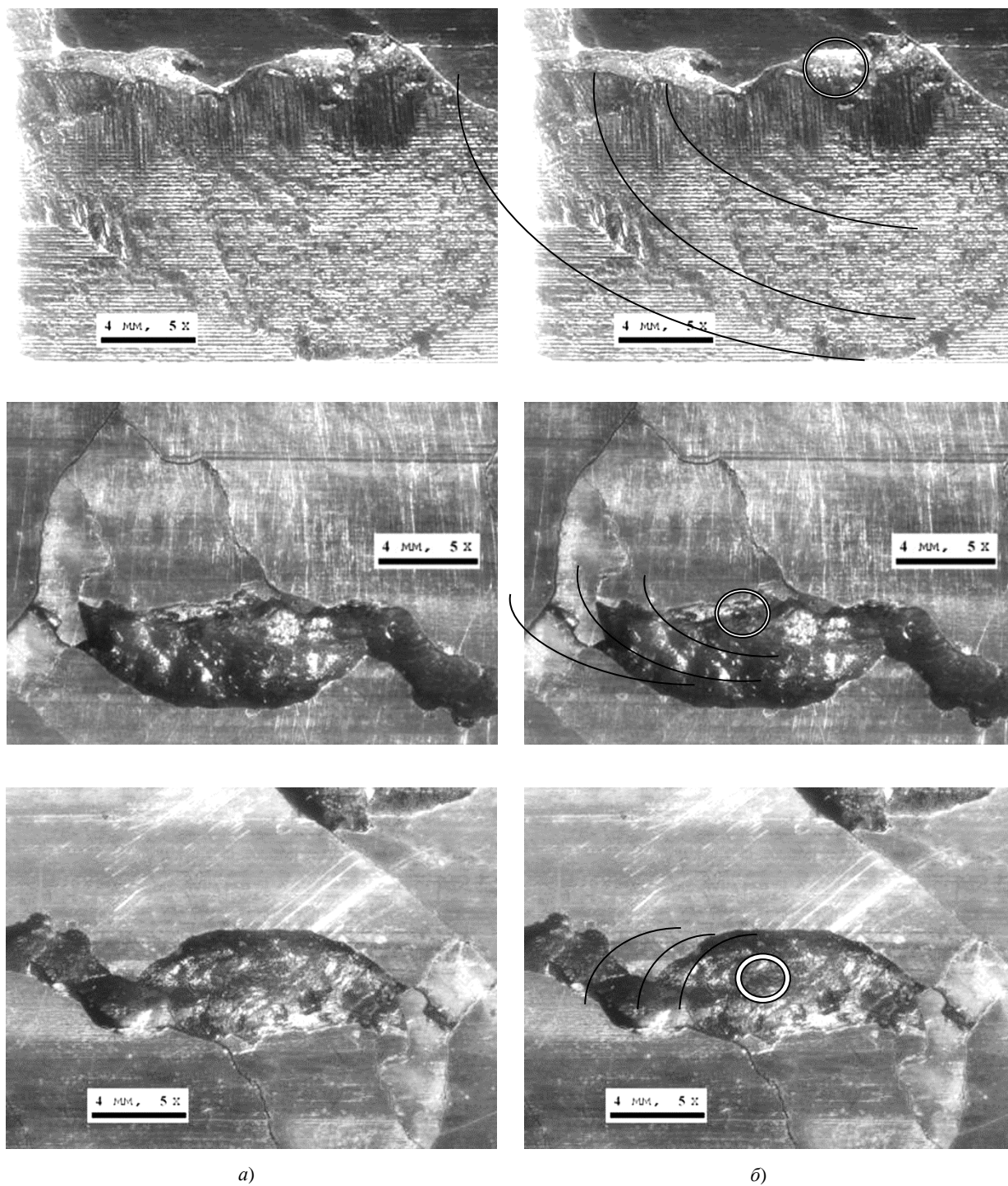
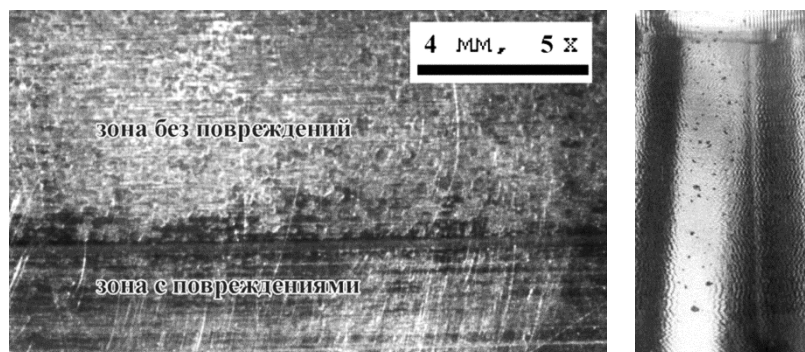


Рис. 5. Участки откола баббита (а) и схемы расположения вероятных очагов со следами остановок фронтов трещины (б)

Fig. 5. Portions of Babbitt cleavages (a) and diagram of likely trouble spots with traces of crack front arrests (b)

Рис. 6. Ямочный микрорельеф на поверхности подложки

Fig. 6. Dimple micro-relief on substrate surface



Зафиксировано (рис. 6), что в зонах без повреждений баббитового слоя морфология микрорельефа подложки характеризуется ямками диаметром до 0,2 мм, где до нанесения слоя баббита могли находиться посторонние прочные частицы. Если перед наплавкой слоя баббита поверхность подложки была недостаточно очищена, отмеченный факт является косвенным признаком причины, способной вызвать повреждение слоя в условиях сжатия узла трения.

Заключение

Conclusion

По данным фрактографического анализа можно заключить, что повреждения в слое баббита в форме трещин и отколов зависят от продолжительности испытаний и локализованы в зонах, примыкающих к боковым поверхностям подшипника. Наблюдаемые дефекты реализованы в условиях сжатия квазипериодической нагрузки.

Результаты металлографических исследований и механических свойств исследуемых образцов позволяют говорить о неполной термической обработке заготовки материала основы разрушенного подшипника. Отсутствие операций «нормализация» и «высокий отпуск» в цикле производства привело к неполной перекристаллизации стали и сохранению внутренних термических напряжений в заготовке, ставших наиболее вероятной причиной отслоения плакирующего слоя в процессе работы подшипника. Причиной подобного нарушения технологической дисциплины стало использование различного сортамента исходных заготовок – поковок по ГОСТ 7505-89 и горячекатаных труб по ГОСТ 8732-78 с соответственно различными требованиями к состоянию поставки.

Проведенные исследования позволили оценить негативное влияние внутренних напряжений мате-

риала заготовки на эксплуатационные свойства высоконагруженных судовых подшипников скольжения. Тем самым показана необходимость ужесточения требований конструкторской документации в части состояния поставки и сортамента исходной заготовки.

Список использованной литературы

1. Воробьева О.В., Самыкина В.А. Современные проблемы и перспективы развития судостроения в России // Эколого-географические проблемы регионов России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Самара, 2017. С. 249–254.
2. Печковский П.Г. Обоснование инновационных технических решений в области корабельной энергетики перспективных многоцелевых кораблей // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7–8. С. 136–143. DOI: 10.53816/23061456_2021_7-8_136.
3. Задачи отечественного двигателестроения по обеспечению текущих и перспективных потребностей морской энергетики / Р.А. Иванов, И.В. Кудинович, В.Г. Хорошев, В.П. Струев // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 2(388). С. 123–136. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-123-136.
4. Мухаметишин И.Т., Максимов М.В., Горбунов С.А. Основные направления развития энергетических установок надводных кораблей Военно-Морского Флота // Военная мысль. 2021. № 8. С. 115–125.
5. Кузнецов Р.В. Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 1. С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.

6. Кузнецов П.В. Опыт применения низкочастотной вибрационной обработки в процессе производства сварных корпусов судовых реверс-редукторных передач // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2022. № 68–69. С. 51–58.

References

1. Vorobyeva O.V., Samykina V.A. Modern problems and prospects of development of shipbuilding in Russia // Ecological and Geographical Problems of the Regions of Russia: Proceedings of VIII All-Russian Scientific-Practical Conference. Samara, 2017. P. 249–254 (in Russian).
2. Pechkovsky P.G. Justification of innovative technical solutions in the field of shipboard power supply of new multipurpose ships // Voprosy oboronnoi tekhniki. Seria 16: Technical means of counter-terrorism 2021. No. 7–8. P. 136–143. DOI: 10.53816/23061456_2021_7–8_136 (in Russian).
3. Tasks of Russian engine building in meeting current and future marine power requirements / R.A. Ivanov, I.V. Kudinovich, V.G. Horoshev, V.P. Struev // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 2(388). P. 123–136. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-123-136 (in Russian).
4. Mukhametshin I.T., Maksimov M.V., Gorbunov S.A. Main vectors of powerplant development for surface

- ships of Russian Navy // Voennaya mysl. 2021. No. 8. P. 115–125 (in Russian).
5. Kuznetsov R.V. Analytical review of foreign experience with development and design of reverse-reduction gears // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103 (in Russian).
 6. Kuznetsov R.V. Experience with application of low-frequency vibratory finishing in production of welded reverse-reduction gear boxes // RS Research Bulletin. 2022. No. 68–69. С. 51–58 (in Russian).

Сведения об авторе

Кузнецов Руслан Валерьевич, к.т.н., главный металлург ПАО «Звезда»; старший преподаватель высшей школы машиностроения ФГАОУ ВО «СПбПУ». Адрес: 192012, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 123. E-mail: kuznetsovrv@zvezda.spb.ru.

About the authors

Ruslan V. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer of Metallurgy of JSC *Zvezda*; Senior Lecturer of Graduate Machine Engineering School, St. Petersburg Polytechnic University. Address: 123, Babushkina st., St. Petersburg, Russia, post code 192012. E-mail: kuznetsovrv@zvezda.spb.ru.

Поступила / Received: 20.06.23
Принята в печать / Accepted: 01.12.23
© Кузнецов П.В., 2023