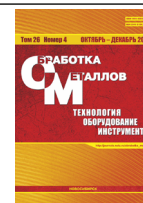




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Анализ изменения микроструктуры компрессионных колец вспомогательного судового двигателя

Елена Сюсюка^{1, а, *}, Елена Аминева^{1, b}, Юрий Кабиров^{2, c}, Наталья Пруцакова^{3, d}

¹ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

² Южный федеральный университет, ул. Большая Садовая, 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

³ Донской государственный технический университет, площадь Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Российская Федерация

^а  <https://orcid.org/0000-0002-4237-0697>,  sollain66@rambler.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8965-9730>,  elika-11@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9975-3410>,  salv62@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2761-286X>,  shpilevay@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 538.911 62–242

История статьи:

Поступила: 24 июня 2024

Рецензирование: 12 августа 2024

Принята к печати: 24 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Судовой двигатель

Надежность

Компрессионные кольца

Износ

Деформации

Микроструктура

Металлографические исследования

Текстурные неоднородности

Охрупчивание кристаллитов

Дифракция рентгеновских лучей

Макро- и микроструктура материала

Плотность дислокаций

Рентгеноструктурный анализ

Микронапряжения

Области когерентного рассеяния

АННОТАЦИЯ

Введение. Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания судового типа подвержена высоким эксплуатационным нагрузкам. От исправной работы цилиндро-поршневой группы зависит надежность, долговечность и экономичность работы всего двигателя. Смена направления движений поршня и недостаточность смазки, обусловленная разбрызгиванием смазочного материала в процессе работы, приводят к повышенному износу движущегося пакета поршневых колец. Определив, под воздействием каких факторов и как меняется структура металла в процессе эксплуатации, можно учитывать эти факторы в технологии изготовления и упрочнения деталей. **Предмет исследований.** Объектами исследования являются отработавшие срок эксплуатации верхнее и нижнее компрессионные кольца цилиндро-поршневой группы вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32. **Цель:** рассмотреть изменения структуры и микроструктуры материала компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации; сравнить результаты оценки микронапряжений и деформаций поверхностного слоя деталей металлографическими методами и методом рентгеноструктурного анализа для различных условий работы верхнего и нижнего компрессионного кольца. **Методы.** В исследовании применены металлографический и рентгеновские методы. Описаны условия рентгеновской съемки; рентгеноструктурный анализ проведен на дифрактометре «Дрон-3М». Определены остаточные микродеформации, а также размеры областей когерентного рассеяния (D) и плотность дислокаций на поверхностях образцов. **Результаты работы.** Представлены результаты металлографического и рентгеноструктурного анализа (PCA). Определены остаточные макро- (σ_0) и микронапряжения, а также размеры областей когерентного рассеяния (D) поверхностного слоя компрессионных колец. Результаты рентгеноструктурного анализа сопоставимы с результатами металлографических исследований, прослеживается сходимость результатов. **Область применения результатов.** Результаты исследования могут применяться при подборе технологии изготовления компрессионных колец судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС). **Выводы.** Целесообразно проводить оценку изменения проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов. Это позволит подобрать оптимальную технологию изготовления компрессионных колец для обеспечения надежности их эксплуатации. Контроль качества колец различными методами оценки структуры также дает возможность прогнозирования условий разрушения компрессионных колец в процессе эксплуатации. Увеличение степени дефектности верхнего кольца происходит вследствие различного рода деформаций кристаллитов. В результате неупругих деформаций при работе кольца рождающиеся дислокации вызывают сильные механические напряжения.

Для цитирования: Анализ изменения микроструктуры компрессионных колец вспомогательного судового двигателя / Е.Н. Сюсюка, Е.Х. Аминева, Ю.В. Кабиров, Н.В. Пруцакова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 180–191. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-180-191.

Введение

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) внутреннего сгорания судового типа подвержена высоким эксплуатационным нагрузкам. От исправной работы ЦПГ зависит надежность, долговечность и экономичность работы всего двигателя. Смена направления движений поршня и недостаточ-

*Адрес для переписки

Сюсюка Елена Николаевна, к.т.н., доцент

Государственный морской университет

им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,

пр. Ленина, 93,

353924, г. Новороссийск, Российская Федерация

Тел.: +7 918 4478192, e-mail: sollain66@rambler.ru

ность смазки, обусловленная разбрызгиванием смазочного материала в процессе работы, приводят к повышенному износу движущегося пакета поршневых колец, находящихся в верхней части цилиндра [1].

В состав ЦПГ входят компрессионные и маслосъемные кольца. Маслосъемные кольца используются в четырехтактных двигателях с системой разбрызгивания смазывающего материала для снятия излишков масла в нижней части цилиндра и регулирования его поступления на верхнюю часть цилиндра. Компрессионные кольца выполняют две функции: уплотнительную и теплоотводящую, а также способствуют распределению масла по стенкам цилиндра во время работы. В процессе работы компрессионные кольца совершают несколько видов движения. *Прямое-обратное (радиальное)* движение колец внутри кепа (канавки под кольцо на цилиндрической поверхности поршня) создает деформации, перпендикулярные образующей, и способствуют износу и колец, и нижней поверхности кепа. Это приводит к ухудшению уплотняющего действия компрессионных колец, а после – к радиальной вибрации и поломке кольца, чаще всего в средней части, напротив замка. *Осевое* перемещение происходит из-за разницы давлений газов над кольцом и под ним, силы тяжести самого кольца и силы трения между кольцом и поверхностью кепа. *Вращательное* движение колец обусловлено оборотами вала двигателя.

Условия работы верхнего и нижнего компрессионного кольца отличаются. Давление за верхним компрессионным кольцом составляет $0,75Pr$, за нижним компрессионным кольцом – $0,20Pr$ (Pr – рабочее давление). Это давление является одной из составляющих силы прижатия колец к цилиндру, а также создает радиальные деформации материала колец, что обуславливает повышенный износ верхнего компрессионного кольца и нижней поверхности кепа, на который осуществляется его посадка.

Срок работы ЦПГ сильно зависит от скорости изнашивания компрессионных колец. С целью повышения срока службы поршневых колец разработаны различные методики упрочнения сопрягаемых поверхностей: пластическое деформирование, закалка токами высокой частоты, создание адгезионных поверхностей, постановка в зоне трения кольца в верхней мертвой точке

износостойких вставок, пористое хромирование, протачивание канавок для заливки оловом, а также нанесение упрочняющих покрытий из молибдена и других материалов, повышающих триботехнические свойства [2, 3].

Из основных конструктивных требований к кольцам выделяются высокие прочность, упругость, износостойкость и малый коэффициент трения. Большое значение имеет равномерное распределение радиального давления по окружности кольца [4].

Поршневые кольца изготавливаются из серого легированного чугуна с пластинчатым графитом или высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Серый чугун наряду с высокими литейными свойствами имеет хорошую демпфирующую способность, высокие антифрикционные свойства и меньшую склонность к термическим деформациям по сравнению со сталью. Различия фазовых состояний серых чугунов, диффузия элементов, неоднородность коэффициентов линейного и объемного расширения феррита, цементита и графита приводят к анизотропии напряженного состояния. Это является источником зарождения и развития дефектов – дислокаций.

Представляется целесообразным оценивать изменение проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов с целью прогнозирования условий разрушения компрессионных колец в процессе эксплуатации. Технология изготовления компрессионных колец определяется требованиями надежности и описана в соответствующих стандартах для каждого вида колец. Контроль качества колец осуществляется различными методами оценки структуры отливок с учетом технологии заковки, нормализации, термической и механической обработки [1–5].

Использование серого чугуна для изготовления компрессионных колец обусловлено его хорошей жидкотекучестью и малой усадкой. Механические свойства чугуна определяются количественным соотношением структурных составляющих, в основном феррита, перлита и графита. Чугун с перлитной основой наиболее прочен и износоустойчив. Феррит снижает механические свойства чугуна. Крупные включения графита снижают прочность, но обеспечивают высокую циклическую вязкость и низкую чувствительность к внешним надразам. В процес-

се эксплуатации структуры материала верхнего и нижнего колец претерпевают значительные изменения. Кольца, изготовленные из серого легированного чугуна с пластинчатым графитом, должны иметь определенную микроструктуру: металлическая основа состоит из средне- и мелкопластинчатого или сорбитообразного перлита. Перлит соответствует высокой твердости, износостойкости и хорошей обрабатываемости резанием. Наличие феррита в виде отдельных мелких включений не должно превышать 5 % площади шлифа. Феррит свидетельствует о снижении механических свойств и износостойкости чугуна. Неструктурный цементит не допускается. Фосфидная эвтектика может присутствовать в виде мелких равномерных включений или разорванных сеток, при этом тройная фосфидная эвтектика с пластинками не допускается [6].

Появление в структуре цементита приводит к хрупкости [7, 8]. Согласно ГОСТ 7133–80 кольца, изготовленные из чугуна с шаровидным графитом в качестве металлической основы, должны содержать тонко-, мелко- и среднепластинчатый перлит или сорбитообразный перлит. Процентное содержание цементита в виде мелких включений не должно превышать 10 %, для феррита – не более 10 % площади шлифа.

Существуют методики оптико-математического метода описания металлографических изображений, позволяющие оценить процентное содержание включений различных фаз высокохромистого чугуна [9].

Проблема повышения надежности ЦПГ может быть решена путем всесторонних исследований возможных эксплуатационных изменений материалов с применением современной испытательной, исследовательской техники и аналитических программ. При любом динамическом и тепловом воздействии на кольца в процессе эксплуатации внутренняя структура материала изменяется, а зона пластической деформации приобретает характерные особенности. Это подтверждается послойным текстурным анализом металла в области хрупких изломов для недеформированного нового образца и образца с дефектами после эксплуатации [10].

Увеличение плотности дислокаций, изменение микроструктуры и возможное появление

текстурных неоднородностей можно исследовать, применяя металлографические методы и дифракцию рентгеновских и электронных лучей [11–14].

Анализ литературы по данной тематике позволяет сделать выводы о взаимосвязи изменений структуры и эксплуатационных свойств материала.

В работе [15] исследователи выяснили, что при изменении материала рабочих органов погружных насосов из чугуна, когда пластинчатая форма включений графита меняется на шаровидную, существенно улучшаются такие эксплуатационные характеристики чугуна, как прочность и пластичность, но проявляется повышенная объемная усадка и ухудшается жидкотекучесть. Эти факторы необходимо учитывать при подборе технологии изготовления компрессионных колец.

Прослеживается похожий характер влияния изменения микроструктуры на свойства материала для чугунов и для сталей. Анализ изменений микроструктуры и кристаллографической текстуры ферритной стали при коррозионном разрушении под нагрузкой (КРН) с помощью растровой электронной микроскопии позволил установить размер и тип неметаллических включений, элементный состав продуктов коррозии, а также характер разрушения в зоне действия КРН [16]. В рамках рентгеноструктурного анализа (РСА), при котором учитывали форму и размер зерен-кристаллитов, кристаллографическую текстуру, заселенность кристаллической решетки атомами, атомные смещения, фактор Дебая – Уоллера и инструментальное уширение линий, были оценены параметры тонкой структуры ферритной стали в зоне разрушения и в свободной от КРН зоне. Показано, что область разрушения характеризуется высокой плотностью внесенных дислокаций краевого типа, сильными упругими искажениями кристаллической решетки и относительно малым размером областей когерентного рассеяния (ОКР).

Множество исследований различных видов стали показывает, что с повышением скорости деформации при высоких температурах увеличивается пороговая деформация, возникающая перед началом динамической рекристаллизации аустенита. При использовании микролегирова-

ния бором наблюдается обратный эффект – пороговая деформация уменьшается. Наличие бора в растворе способствует образованию зерен на границах, что препятствует перестройкам атомов и облегчает миграцию этих зерен. Быстрая динамическая рекристаллизация улучшает пластичность стали и способствует измельчению, что снижает ее хрупкость [17, 18].

Интересно также изучение воздействия напряженно-деформированного состояния на распространение трещин в квазисколах стали, подверженной охрупчиванию из-за наличия водорода. Исследовалась роль водорода в механизме распространения трещин, и было установлено, что путь трещин в квазисколах в охрупченных водородом ферритных и ферритно-перлитных низкоуглеродистых сталях определяется в большей степени характером напряженно-деформированного состояния, чем микроструктурой или кристаллографической ориентацией отдельных зерен [19].

Существуют новые технологии производства стальных поршневых колец, которые предусматривают шлифование поверхности [20] и нанесение износостойких покрытий, например разработанный метод трехслойного упрочнения их поверхности. Этот метод включает в себя карбонитрацию, ионную имплантацию нитрида титана, а затем сульфидирование, что приводит к улучшенной обработке и повышенной износостойкости поршневых колец [21]. Очень эффективным в упрочнении поршневых колец может оказаться метод электроакустического напыления [22]. Получающееся при таком способе нанесения нанокристаллическое покрытие на поверхности металла менее подвержено релаксации, что позволяет в 6...8 раз увеличить ресурс работы детали.

Цели исследования: рассмотреть изменения структуры и микроструктуры материала верхнего и нижнего компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации этих колец в различных условиях и при различных нагрузках; сравнить микронапряжения, возникающие вследствие деформаций поверхностного слоя верхнего и нижнего компрессионных колец, используя металлографические методы и метод рентгеноструктурного анализа.

Методика исследований

Предметами исследования являются отработавшие срок эксплуатации поршневые компрессионные кольца (верхнее и нижнее) вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32.

Существующие методики металлографических исследований и рентгеновской дифрактометрии [14–24] позволяют исследовать напряженное состояние и атомную структуру, микродеформации, а также разброс размеров частиц материала.

В настоящем исследовании для изучения микроструктуры компрессионных колец были использованы металлографический и рентгеновские методы.

Изменение структуры материала верхнего кольца при износе, вызванном различиями в условиях эксплуатации верхнего и нижнего компрессионных колец, приводит к потере подвижности нижнего кольца. Это означает, что всю тепловую и механическую нагрузку несет горячий резерв верхнего кольца. Анализ изменения структуры материала верхнего и нижнего колец позволит подтвердить различия в динамических и тепловых воздействиях на материал в процессе эксплуатации, что позволит определить технологические параметры для изготовления колец и их специального упрочнения.

Образцы для приготовления шлифов с целью определения микроструктуры и фазового состава материала сделаны методом порезки перпендикулярно образующей кольца (рис. 1). Поскольку динамические и тепловые нагрузки равновероятны по всем радиальным направлениям в плоскости кольца, то место пореза особого значения не имеет. При наличии возможного разлома или трещины место пореза должно соседствовать с дефектом.

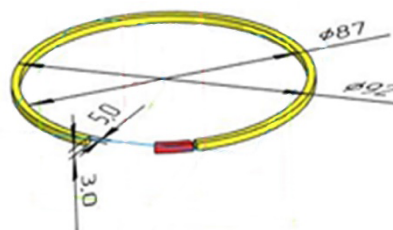


Рис. 1. Схема порезки кольца

Fig. 1. Ring cutting pattern

Подготовка микрошлифа для проведения металлографических исследований проводилась в соответствии с методикой, определенной ГОСТ.

Для выявления всей микроструктуры выполнялось травление шлифа раствором нитрата (4%-го спиртового раствора HNO_3) в течение одной минуты. Качество травления контролировалось с помощью металлографического микроскопа ММН-2. С помощью этого же микроскопа были получены фотографии микроструктуры шлифов поперечного среза колец (рис. 2, 3).

Рентгеноструктурные исследования при комнатной температуре проводились на дифрактометре «Дрон-3М». Съемка дифракционных профилей велась по геометрии Брэгга – Брентано на $\text{CuK}\alpha$ -излучении с длиной волны $1,5406 \text{ \AA}$ (среднее значение длины волны $\text{K}\alpha_{1,2}$ меди, обычно используемое для обработки рентгенограмм) в интервале углов $20^\circ < 2\theta < 90^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$ и временем набора импульсов в каждой точке $t = 2 \text{ с}$. Дифракционные профили компрессионных колец обрабатывались с помощью компьютерной программы PowderCell версии 2.3, для анализа и уточнения структурных характеристик использовалась база данных ICSD. Отметим, что значительный фон на рентгенограммах связан с флуоресценцией железа при возбуждении его атомов излучением $\text{K}\alpha$ меди.

Определены параметры решетки, размеры областей когерентного рассеяния на поверхностях образцов, а также микроискажения (микродеформации) решетки и плотность дислокаций.

Для оценки эффективных размеров D областей когерентного рассеяния (блоков мозаики) использовалась формула Селякова – Шеррера [23]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы частиц и близкий к единице; λ – длина волны излучения; β – полуширина дифракционного отражения; θ – угол дифракции.

Плотность дислокаций ρ_D [24] была рассчитана по эффективным размерам кристаллитов согласно формуле

$$\rho_D = 3D^{-2}. \quad (2)$$

Оценка размеров областей когерентного рассеяния D проводилась по наиболее интенсивному дифракционному отражению 110, лежащему

в области небольших углов 2θ . Для него можно не учитывать уширение отражений, вызванное дублетом $\text{K}\alpha_1$ - $\text{K}\alpha_2$, существенное на больших углах дифракции.

Вклад в уширение дифракционных линий из-за микродеформаций также присутствует; относительную деформацию решетки $\frac{\Delta d}{d}$ [25] определяли по формуле

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\beta}{4\text{tg}\theta}. \quad (3)$$

Проведенное разделение вкладов микронапряжений и измельчения кристаллитов в уширение дифракционных отражений показало, что основное влияние на уширение отражений оказывают микродеформации.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура недеформированных колец, не подвергшихся эксплуатации (рис. 2, а), состоит из включений графита и перлитной матрицы. Кроме этого, на микроструктуре видно небольшое количество зерен феррита, но их количество невелико – около 5 %. Фотографии микроструктуры (рис. 2, б и 3) поперечных шлифов отработавших эксплуатационный срок компрессионных колец указывают на соответствие мелкопластинчатой перлитной основы чугуна с незначительным (не более 5 %) включением ферритных зёрен [6, 9, 11]. Это отвечает международным стандартам для компрессионных колец. Схемы допустимых для материала компрессионных колец структур подбирались согласно ГОСТ 3443–87 (Межгосударственный стандарт «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры») [6].

Первая фотография представляет микроструктуру верхнего компрессионного кольца и показывает наличие пластинчатого цемента: основой является мелкопластинчатый перлит с незначительным включением ферритных зерен; наличие некоторого количества элементов цемента говорит об увеличенной хрупкости этого материала. Измеренная твердость материала кольца по Бринелю составляет HB135 (регламентируемая для компрессионных колец судовых ДВС данного размера – 92...102). Увеличение твердости сопровождается большей хрупкостью

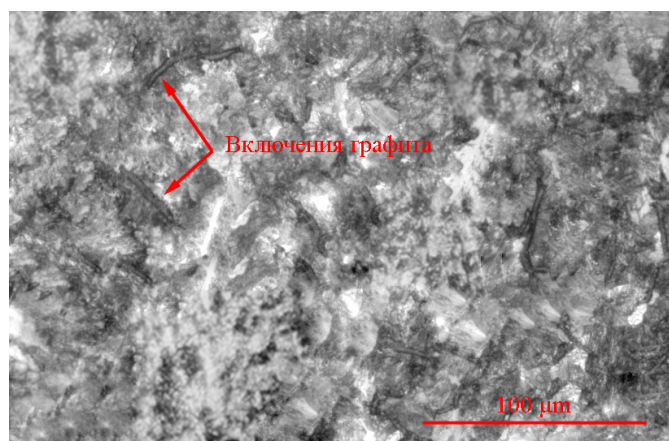
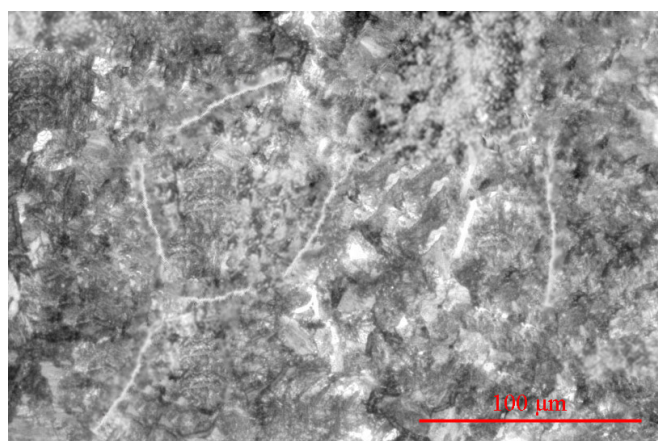
*a**б*

Рис. 2. Фотография микроструктуры верхнего компрессионного кольца:

a – до деформации в ходе эксплуатации; *б* – после деформации в ходе эксплуатации

Fig. 2. Photo of the microstructure of the upper compression ring:

a – before deformation during operation; *б* – after deformation during operation

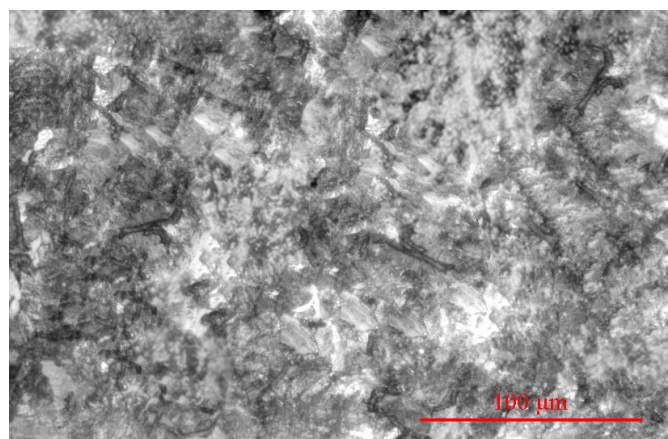


Рис. 3. Фотография микроструктуры нижнего компрессионного кольца

Fig. 3. Photo of the microstructure of the lower compression ring

материала. Вторая фотография представляет микроструктуру нижнего компрессионного кольца: первичной основой является перлит с включениями мелкозернистого феррита. Твердость материала нижнего компрессионного кольца составляет менее HB85. Нижнее кольцо подвергается меньшему температурному воздействию, поэтому структурные изменения здесь существенно ниже. Однако циклические нагрузки и деформационное воздействие приводят к образованию усталостных трещин и снижению механических характеристик.

Включения цементита верхнего компрессионного кольца занимают большую площадь, чем

включения цементита нижнего компрессионного кольца. Это указывает на более значительные механические и тепловые нагрузки на верхнее кольцо. Согласно микрофотографическим снимкам в наиболее нагруженном материале также наблюдается измельчение микросталлитов, что коррелирует с данными рентгеновской дифракции. Результаты обработки данных рентгеновской дифракции приведены в таблице.

На рис. 4, *a*, *б* показаны фрагменты рентгенограмм поверхностей нижнего (*a*) и верхнего (*б*) компрессионных колец. Как показали рентгеноструктурные исследования (см. таблицу), в верхнем компрессионном кольце по сравнению с нижним кольцом наблюдается увеличение плотности дислокаций (приблизительно на 60 %), а также большие величины микродеформаций решетки (приблизительно на 30 %). Кроме того, в верхнем компрессионном кольце имеет место большее измельчение областей когерентного рассеяния (среднего размера областей совершенства *D*), примерно на 20 %, что в эксперименте соответствует большим значениям полуширин рентгеновских отражений (рис. 4) и некоторому увеличению параметров ячейки.

Выводы

В работе методами рентгеновской дифракции и металлографического анализа экспериментально установлены изменения структуры,

Результаты обработки данных рентгеновской дифракции

Results of X-ray diffraction data processing

Фаза	a , Å	V , Å ³	hkl	2θ	β , град	D , Å	Плотность дислокаций ρ_D , см ⁻²	Микроискажения решетки $\Delta d/d$
Fe, нижнее кольцо	2,8785	23,9	110	44,20	0,5	180	$9,3 \cdot 10^{11}$	0,00758
Fe, верхнее кольцо	2,8870	24,1	110	44,07	0,63	142	$14,8 \cdot 10^{11}$	0,00998

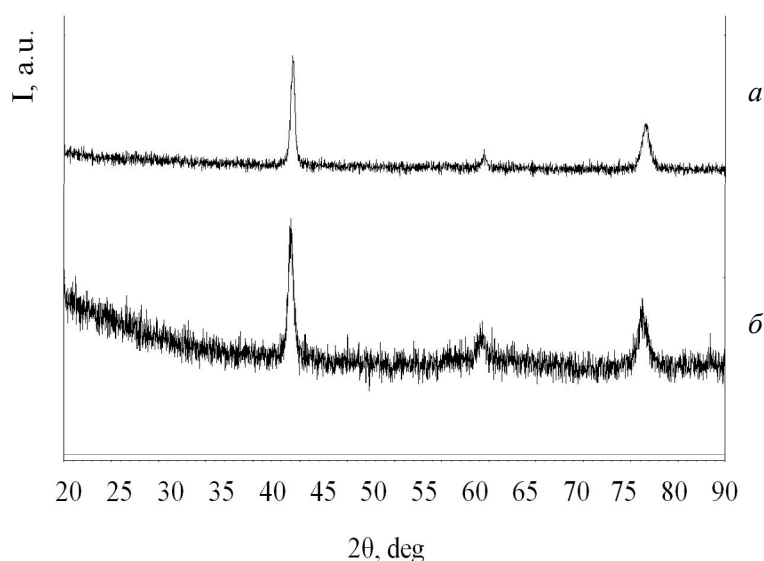


Рис. 4. Рентгенограммы поверхностей нижнего (а) и верхнего (б) компрессионных колец

Fig. 4. X-ray patterns of the surfaces of the lower (a) and upper (b) compression rings

микроструктуры и твердости материала компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации.

Установлено различие полуширин рентгеновских дифракционных отражений железа в материале верхнего компрессионного кольца по сравнению с нижним, что свидетельствует об уменьшении среднего размера областей когерентного рассеяния в связи с различными условиями эксплуатации колец. При этом наблюдается различие в плотности дислокаций в 1,6 раза, она составляет $9,3 \cdot 10^{11}$ см⁻² для нижнего компрессионного кольца и $14,8 \cdot 10^{11}$ см⁻² для верхнего компрессионного кольца. Установлено также различие в величинах микродеформаций для двух колец: для нижнего компресси-

онного кольца они выше примерно в 1,3 раза. Следует отметить увеличенные значения параметров кристаллической решетки железа для верхнего кольца по сравнению с нижним.

Таким образом, результаты металлографического и рентгеновского анализа свидетельствуют о большей степени дефектности верхнего компрессионного кольца по сравнению с нижним вследствие большего измельчения микрокристаллитов и появления более сильных напряжений из-за рождающихся дислокаций и неупругих деформаций при работе кольца.

Из полученных результатов следует, что для повышения долговечности и устойчивости работы колец необходимо упрочнение самого материала колец, а также поверхностей этих колец. Целесообразным представляется оценивать из-



менения проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов. Это позволит подобрать оптимальную технологию изготовления компрессионных колец для обеспечения надежности их работы. Контроль качества колец с использованием различных методов также позволяет прогнозировать условия, в которых могут произойти повреждения компрессионных колец во время эксплуатации.

Список литературы

1. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета, испытаний. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 288 с.
2. Исследование эффективности использования слоистого модификатора трения в цилиндро-поршневой группе судового дизельного двигателя / И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, Н.В. Прямухина, Е.А. Стринжа // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1 (41). – С. 135–142.
3. Тейлор Д.А. Основы судовой техники. – М.: Транспорт, 1987. – 320 с.
4. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. – М.: Моркнига, 2010. – 260 с.
5. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 4 (17). – С. 141–150. – EDN YPQCXS.
6. Martyushev N.V., Pashkov E.N. Bronze sealing rings defects and ways of its elimination // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 82–86. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.82.
7. Анисович А.Г., Андрушевич А.А. Микроструктуры черных и цветных металлов. – Минск: Белорусская наука, 2015. – 131 с. – ISBN 978-985-08-1883-6.
8. Структурообразование высокохромистых чугунов в интервале температур магнитного превращения карбидных фаз / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин, А.И. Сидашенко, В.К. Аветисян // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 129–134. – DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-129-134. – EDN JX-WBPD.
9. A methodological approach to the simulation of a ship's electric power system / I.P. Boychuk, A.V. Grinek, N.V. Martyushev, R.V. Klyuev, B.V. Malozyomov, V.S. Tynchenko, V.A. Kukartsev, Y.A. Tynchenko, S.I. Kondratiev // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 8101. – DOI: 10.3390/en16248101.
10. Клевцов Г.В., Перлович Ю.А., Фесенко В.А. К развитию рентгеновского метода идентификации изломов с испорченной поверхностью // Заводская лаборатория. – 1993. – Т. 59, № 8. – С. 34–37.
11. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.
12. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
13. Сюсюка Е.Н., Савченко М.М. Дифрактометрические методы анализа судовых технических средств // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4 (101). – С. 148–151. – DOI: 10.34046/aumsomt101/22. – EDN PTUQBC.
14. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022. – EDN HXFODE.
15. Новый метод изготовления рабочих органов погружных центробежных насосов из аустенитного чугуна с шаровидным графитом / Н.С. Гушин, Е.В. Ковалевич, Л.А. Петров, Е.С. Пестов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2008. – № 4 (24). – С. 44–48. – EDN JVCWUF.
16. Microstructure and crystallographic structure of ferrate steel subject to stress corrosion cracking / V.D. Sitdikov†, A.A. Nikolaev, G.V. Ivanov, A.K. Makatrov, A.V. Malinin // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 65–70. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-65-70. – EDN EGVNMD.
17. Kniazuk T.V., Zisman A.A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 71–75. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-71-75. – EDN SCNCMW.
18. Влияние напряженно-деформированного состояния на путь распространения трещин квазисколла в низкоуглеродистой стали, охрупченной водородом / Е.Д. Мерсон, В.А. Полуянов, П.Н. Мягих, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 298–303. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-298-303. – EDN DUKKFP.
19. Оханкин К.А., Кудрявцев А.С. Исследование влияния длительной высокотемпературной эксплуатации на структуру и свойства аустенитной хромоникельмолибденовой стали // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 21–26. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-21-26. – EDN LNFVNV.
20. Околович Г.А., Карпов С.В., Ларещева О.С. Новые технологии в производстве стальных поршневых

вых колец // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 2 (23). – С. 27–28. – EDN NKADLT.

21. Технология нанесения износостойкого покрытия стальных поршневых колец / Г.А. Околович, А.М. Гурьев, В.Н. Шабалин, А.Е. Сизова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 50–52. – EDN PUJQFJ.

22. *Nekrasova T.V., Melnikov A.G.* Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 77–81. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

23. Morphological features of polycrystalline $CdS_{1-x}Se_x$ films obtained by screen-printing method / D.M. Strateichuk, N.V. Martyushev, R.V. Kly-

uev, V.A. Gladkikh, V.V. Kukartsev, Y.A. Tynchenko, A.I. Karlina // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 825. – DOI: 10.3390/cryst13050825.

24. *Васильев Д.М., Смирнов Б.И.* Некоторые рентгенографические методы изучения пластически деформированных металлов // *Успехи физических наук*. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 503–558.

25. *Bosikov I.I., Ereemeeva S.V., Karlina A.I.* Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 528. – DOI: 10.3390/cryst13030528.

26. *Ardashkin I.B., Yakovlev A.N.* Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 912–916. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Analysis of changes in the microstructure of compression rings of an auxiliary marine engine

Elena Syusyuka^{1, a, *}, Elena Amineva^{1, b}, Yuri Kabiroy^{2, c}, Natalia Prutsakova^{3, d}

¹ Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

² South Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya str., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

³ Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4237-0697>,  sollain66@rambler.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8965-9730>,  elika-11@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9975-3410>,  salv62@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2761-286X>,  shpilevay@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 June 2024

Revised: 12 August 2024

Accepted: 24 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Marine engine

Reliability

Compression rings

Wear

Deformations

Microstructure

Metallographic studies

Textural inhomogeneities

Embrittlement of crystallites

X-ray diffraction

Macro- and microstructure

of the material

Dislocation density

Phase analysis

Microstresses

Coherent scattering regions

ABSTRACT

Introduction. The cylinder-piston group (CPG) of a marine-type internal combustion engine is subjected to high operational loads. The reliability, durability and efficiency of the engine depend on the proper operation of the CPG. The change in the direction of piston movement and the lack of lubrication caused by the spraying of lubricant during operation, lead to increased wear of the moving package of piston rings. Having determined the factors influencing the changes in the structure of the metal during operation, it can be taken into account in the manufacturing technology and hardening of these parts. **The subject of the study:** the object of research is the used-out upper and lower compression rings of the cylinder-piston group of the *HIMSEN 4H21/32* auxiliary marine engine. **Purpose of the work** is to consider the change in the structure and microstructure of the material of the compression piston rings of the *HIMSEN 4H21/32* auxiliary marine engine arising as a result of operation; to compare the results of evaluating microstresses and deformations of the surface layer of parts by metallographic methods and X-ray diffraction analysis for various operating conditions of the upper and lower compression rings. **Methods.** Metallographic and X-ray methods were used in the study. The conditions of X-ray photography are described; X-ray diffraction analysis was carried out on a *Dron-3M* diffractometer. Residual microdeformations were determined, as well as the sizes of coherent scattering regions (*D*) and the density of dislocations on the surfaces of the samples. **Results of the work.** The results of metallographic and X-ray diffraction analysis (*XRD*) are presented. The residual macro- and microstresses and the sizes of the coherent scattering regions (*D*) of the surface layer of compression rings are determined. The results of X-ray diffraction analysis are comparable with the results of metallographic studies, and the convergence of the results is observed. **Scope of the results application:** the results of the study can be used in the selection of manufacturing technology for compression rings of marine internal combustion engines (*MICE*). **Conclusions.** It is advisable to evaluate changes in the manifestations of the stress state of cast iron under the influence of various factors. This will allow selecting the optimal technology for manufacturing compression rings to ensure the reliability of its operation. Ring quality control by various methods of structure assessment also makes it possible to predict the conditions of destruction of compression rings during operation. An increase in the degree of defectiveness of the upper ring occurs due to various kinds of deformations of the crystallites. As a result of inelastic deformations during ring operation, the resulting dislocations cause strong mechanical stresses.

For citation: Syusyuka E.N., Amineva E.H., Kabiroy Yu.V., Prutsakova N.V. Analysis of changes in the microstructure of compression rings of an auxiliary marine engine. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 180–191. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-180-191. (In Russian).

References

1. Putintsev S.V. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniya, rascheta, ispytaniy* [Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation, testing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 288 p.

* Corresponding author

Syusyuka Elena N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Admiral Ushakov State Maritime University,
 93, Lenin Ave.,
 353924, Novorossiysk, Russian Federation
 Tel.: +7 918 4478192, e-mail: sollain66@rambler.ru

2. Guzhvenko I.N., Chanchikov V.A., Pryamukhina N.V., Strinzha E.A. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya sloistogo modifikatora treniya v tsilindroporshnevoi gruppe sudovogo dizel'nogo dvigatelya [Researching of the efficiency of the use of a layer frequency modificador in the cylinder-piston group of the ship diesel engine]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2018, vol. 3-1 (41), pp. 135–142.
3. Taylor D.A. *Introduction to marine engineering*. London, Boston, Butterworths, 1990 (Russ. ed.: Teilor D.A. *Osnovy sudovoi tekhniki*. Moscow, Transport Publ., 1987. 320 p.).
4. Voznitskii I.V., Punda A.S. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. T. 1 [Marine internal combustion engines. Vol. 1]. Moscow, Morkniga Publ., 2010. 260 p.
5. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Klochko O.Yu., Saychuk A.V., Rybalko I.N. Otsenka lokal'noi strukturnoi neodnorodnosti v otlivkakh iz serogo chuguna [Evaluation of local structural inhomogeneity in castings from the grey cast-iron]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2017, vol. 4 (17), pp. 141–150. (In Russian).
6. Martyushev N.V., Pashkov E.N. Bronze sealing rings defects and ways of its elimination. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 82–86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.82.
7. Anisovich A.G., Andrushevich A.A. *Mikrostruktury chernykh i tsvetnykh metallov* [Microstructures of ferrous and non-ferrous metals]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 131 p. ISBN 978-985-08-1883-6.
8. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L., Sidashenko A.I., Avetisyan V.K. Strukturoobrazovanie vysokokhromistykh chugunov v intervale temperatur magnitnogo prevrashcheniya karbidnykh faz [Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of magnetic transformation of carbide phases]. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2020, vol. 10 (2), pp. 129–134. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-129-134.
9. Boychuk I.P., Grinek A.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A., Kondratiev S.I. A methodological approach to the simulation of a ship's electric power system. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 8101. DOI: 10.3390/en16248101.
10. Klevtsov G.V., Perlovich Yu.A., Fesenko V.A. K razvitiyu rentgenovskogo metoda identifikatsii izlomov s isporchennoi poverkhnost'yu [Towards the development of an X-ray method for identifying fractures with a damaged surface]. *Zavodskaya laboratoriya = Industrial Laboratory*, 1993, vol. 59, no. 8, pp. 34–37.
11. Brandon D., Kaplan W.D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, New York, J. Wiley, 1999 (Russ. ed.: Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 384 p. ISBN 5-94836-018-0).
12. Vidayev I.G., Martyushev N., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
13. Syusyuka E.N., Savchenko M.M. Difraktometricheskie metody analiza sudovykh tekhnicheskikh sredstv [Diffraction methods of analysis of ship technical means]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta = Operation of marine transport*, 2021, no. 4 (101), pp. 148–151. DOI: 10.34046/aumsuomt101/22.
14. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
15. Gutschin N.S., Kovalevich E.V., Petrov L.A., Pestov E.S. Novyi metod izgotovleniya rabochikh organov pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov iz austenitnogo chuguna s sharovidnym grafitom [The new method of operating element production of the sinking rotary pumps made of austenitic iron with spherical graphite]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*, 2008, no. 4 (24), pp. 44–48.
16. Sitdikov V.D., Nikolaev A.A., Ivanov G.V., Makatrov A.K., Malinin A.V. Microstructure and crystallographic structure of ferrite steel subject to stress corrosion cracking. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 65–70. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-65-70.
17. Kniazuk T.V., Zisman A.A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 71–75. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-71-75.
18. Merson E.D., Poluyanov V.A., Myagkih P.N., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Vliyanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na put' rasprostraneniya treshchin kvaziskola v nizkouglerodistoi stali, okhrupchennoi vodorodom [Effect of the stress-strain state on the path of quasi-cleavage hydrogen-assisted cracking in low-carbon steel]. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2021, vol. 11 (3), pp. 298–303. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-298-303.
19. Okhapkin K.A., Kudryavtsev A.S. Issledovanie vliyaniya dlitel'noi vysokotemperaturnoi ekspluatatsii na strukturu i svoystva austenitnoi khromonikel'molibdenovoi stali [Study of the influence of long-term high-tempera-

ture operation on the structure and properties of austenitic chromium-nickel-molybdenum steel]. *Pis'ma o materialakh* = *Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 21–26. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-21-26.

20. Okolovich G.A., Karpov S.V., Lareshcheva O.S. Novye tekhnologii v proizvodstve stal'nykh porshnevykh kolets [New technologies in the production of steel piston rings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2004, no. 2 (23), pp. 27–28.

21. Okolovich G.A., Guriev A.M., Shabalin V.N., Sizova A.E. Tekhnologiya naneseniya iznosostoikogo pokrytiya stal'nykh porshnevykh kolets [Technology for deposition of wear-resistant coating of piston rings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 50–52.

22. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 77–81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

23. Strateichuk D.M., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Gladkikh V.A., Kukartsev V.V., Tynchenko Y.A., Karlina A.I. Morphological features of polycrystalline $CdS_{1-x}Se_x$ films obtained by screen-printing method. *Crystals*, 2023, vol. 13, p. 825. DOI: 10.3390/cryst13050825.

24. Vasiliev D.M., Smirnov B.I. Nekotorye rentgenograficheskie metody izucheniya plasticheski deformirovannykh metallov [Certain X-ray diffraction methods of investigating cold worked metals]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* = *Soviet Physics Uspekhi*, 1961, vol. 73 (3), pp. 503–558. (In Russian).

25. Bosikov I.I., Ereemeeva S.V., Karlina A.I. Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice. *Crystals*, 2023, vol. 13, p. 528. DOI: 10.3390/cryst13030528.

26. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).