

КОНТРОЛЬ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2024 г. С.А. Бехер¹, А.А. Попков¹, А.С. Выплавень¹, В.Н. Федоринин^{2,*},
В.И. Сидоров², С.П. Шляхтенков^{1,**}, И.Ю. Кинжагулов³

¹Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси
Ковальчук, 191

²Филиал ИФП СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
Россия 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 2/1

³Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург,
Кронверкский просп., 49, литера А

E-mail: *fedorinin55@mail.ru; **shlyakhtenkow@gmail.com

Поступила в редакцию 23.11.2023; после доработки 05.12.2023

Принята к публикации 08.12.2023

Приведены результаты экспериментальных исследований возможности использования тензометрии при локальном импульсном тепловом воздействии для контроля натяга прессовых соединений колец подшипников с валами. Изготовлены образцы прессовых соединений с натягами в диапазоне от 38 до 118 мкм. В результате исследования закономерностей распространения теплового потока в кольцах подшипников и образцах натяга контактным методом и средствами тепловизионного контроля показана возможность разделения деформаций, связанных с влиянием температуры на область измерения деформаций и градиента температуры в области нагрева. Экспериментально реализованы способы контроля прессового соединения при воздействии на кольцо нагревателя с запасом тепловой энергии 80 кДж и температурой 200 °С и измерением деформаций кольца и вала оптико-поляризационным датчиком с базой 60 мм и ценой наименьшего разряда 2×10^{-7} относительных единиц деформаций. Установлена корреляционная связь времени достижения максимума локальных деформаций вала с натягами прессовых соединений и знака деформаций кольца подшипника с неплотностью прессовой посадки, зазором между кольцом и валом.

Ключевые слова: прессовые соединения, неразрушающий контроль, тепловое воздействие, механические напряжения, трение, деформации, оптико-поляризационный датчик.

INSPECTION OF PRESS JOINTS BASED ON THE ANALYSIS OF THEIR DEFORMATION PATTERNS UNDER LOCAL THERMAL LOADING

© 2024 г. S.A. Becher¹, A.A. Popkov¹, A.S. Vyplaven¹, V.N. Fedorinin^{2,*}, V.I. Sidorov², S.P.
Shlyakhtenkow^{1,**}, I.Y. Kinzhagulov³

¹Siberian transport university, Russian Federation 630049 Novosibirsk, str. Dusi Kovalchuk, 191

²Branch of IFP SB RAS "Design and Technological Institute of Applied Microelectronics", Russia 630090
Novosibirsk, ak. Lavrentieva ave., 2/1,

³ITMO National Research University, Russia 197101, St. Petersburg, Kronverksky Prospekt, 49, litera A
E-mail: *fedorinin55@mail.ru; **shlyakhtenkow@gmail.com

The results of experimental studies of the possibility of using strain gauges under local pulsed thermal loading to evaluate the tension of the press connections of bearing rings with shafts are presented. Samples of press joints with tightness in the range from 38 to 118 microns were made. As a result of the study of the patterns of heat flow propagation in bearing rings and tension samples by contact method and means of thermal imaging, the possibility of separating deformations associated with the influence of temperature on the deformation measurement area and the temperature gradient in the heating area is shown. The methods of inspecting the press joint when exposed to a heater ring with a heat power capacity of 80 kJ and a temperature of 200°C and measuring the deformations of the ring and shaft by an opto-polarizing sensor with a base of 60 mm and a resolution of 2×10^{-7} relative deformations have been experimentally implemented. A correlation has been established between the time of reaching the maximum of local deformations of the shaft with the tightness of the press joints and the sign of deformations of the bearing ring with the tightness of the press fit, the gap between the ring and the shaft.

Keywords: press connections, non-destructive testing, thermal effects, mechanical stresses, friction, deformations, optical-polarizing sensor.

DOI: 10.31857/S0130308224010056

ВВЕДЕНИЕ

Проблема внутреннего напряженно-деформированного состояния [1] сопряженных тел напрямую связана с вопросами прочности и надежности конструкций. Задача определения параметров состояния является актуальной для таких отраслей как энергетика, транспорт, машиностроение [2]. В конструкциях машин, механизмов и строительных сооружениях широко применяются прессовые и резьбовые соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения [3, 4]. Необходимый уровень этих сил создается упругими механическими напряжениями [5, 6], формируемыми на этапе монтажа [7]. Надежность [8] таких соединений напрямую зависит от точности измерения размеров перед сборкой [9—11], формы сопрягаемых поверхностей [12] и способности деталей сохранять [13] остаточные механические напряжения на уровне, достаточном для обеспечения неподвижности [14, 15].

В процессе эксплуатации при воздействии ударных [16] и вибрационных нагрузок, износов, развития трещин под напряжением [17], коррозии и повышенного нагрева упругие механические напряжения снижаются. Это приводит к пропорциональному уменьшению сил трения [18]. Когда эти силы становятся ниже рабочих нагрузок, нарушается неподвижность соединения, что является причиной отказов технических средств в эксплуатации. Для их предотвращения необходим периодический контроль сил трения как в прессовых, так и в резьбовых соединениях. Контроль соединений может быть выполнен в процессе прессования [19—21] или при демонтаже [5, 22] по максимальной силе запрессовки. Однако многократные операции демонтажа и повторного монтажа соединений с натягом при плановых видах ремонта оборудования повреждают поверхности деталей и негативно сказывается на их сроке службы [22].

Для контроля прессовых соединений в эксплуатации наибольшее распространение получили акустические методы неразрушающего контроля. Ультразвуковой метод позволяет оценить параметры переходного слоя между деталями [23—25], метод акустоупругости — упругие напряжения в элементах прессовых соединений [26—28]. Акустические методы имеют ряд ограничений, связанных с геометрией объекта контроля, влиянием структуры материала, необходимостью использования сложной и дорогостоящей аппаратуры для измерения малых изменений скоростей распространения методом акустоупругости.

Контроль прессовых соединений может быть выполнен средствами тензометрии с использованием локального импульсного нагружения, в том числе теплового [29]. В этом методе о плотности прессового соединения судят по изменениям механических деформаций элементов соединений при внешнем воздействии [30].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы — расчетно-экспериментальные исследования динамики развития механических напряжений в упругом материале при локальном импульсном тепловом воздействии для определения внутренних напряжений сопряженных поверхностей тел вращения и поиск решений, позволяющих определить остаточные напряжения и состояние поверхности прессовых соединений без нарушения их целостности.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

При контакте двух объектов A и B с нормальными к их общей границе напряжениями σ_{yy}^D возникают касательные напряжения трения $\sigma_{yx}^{тр}$ (рис. 1). Максимальные значения напряжений трения ограничены известным соотношением:

$$|\sigma_{yx}^{тр}| \leq \mu \cdot |\sigma_{yy}^D|, \quad (1)$$

где μ — коэффициент трения, который зависит от свойств материалов, состояния поверхностей и среды между ними.

Локальное переменное во времени тепловое воздействие на объект A создает упругие механические напряжения (рис. 1). Возникающие при этом деформации объекта A зависят как от уровня этих механических напряжений, так и от условий на границе с объектом B . Значительное увеличение локальных деформаций выше начальных упругих деформаций приводит к локальному отрыву поверхности объекта A относительно объекта B , а превышение касательными напряжениями предельного значения трения способно вызвать локальное «проскальзывание» поверхности объекта A .

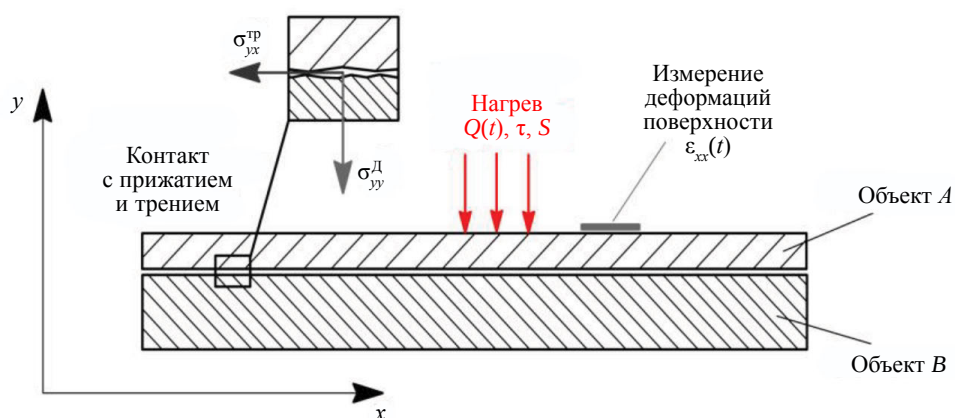


Рис. 1. Постановка задачи.

относительно объекта *B*. Таким образом, решение обратной задачи о деформировании элементов соединения в процессе локального импульсного нагрева при выполнении условия (2) позволит оценить надежность соединения по интегральному показателю: уровню максимальных напряжений трения.

Методика эксперимента и оборудование

Предметом исследования являлись механические деформации (напряжения), формируемые в зоне сопряжения поверхностей тел вращения. Объект исследования — специально изготовленная контрольная группа колец, которые напрессовывались на валы с заранее определенной разностью диаметров валов и колец (рис. 2). Перед прессованием измеряли отклонения диаметров от их номинального значения 130,000 мм с погрешностью не более 5 мкм. Натяг определяли как сумму абсолютных значений положительного отклонения диаметра вала и отрицательного отклонения внутреннего диаметра кольца (см. рис. 2):

$$n = \Delta_1 + \Delta_2. \quad (2)$$

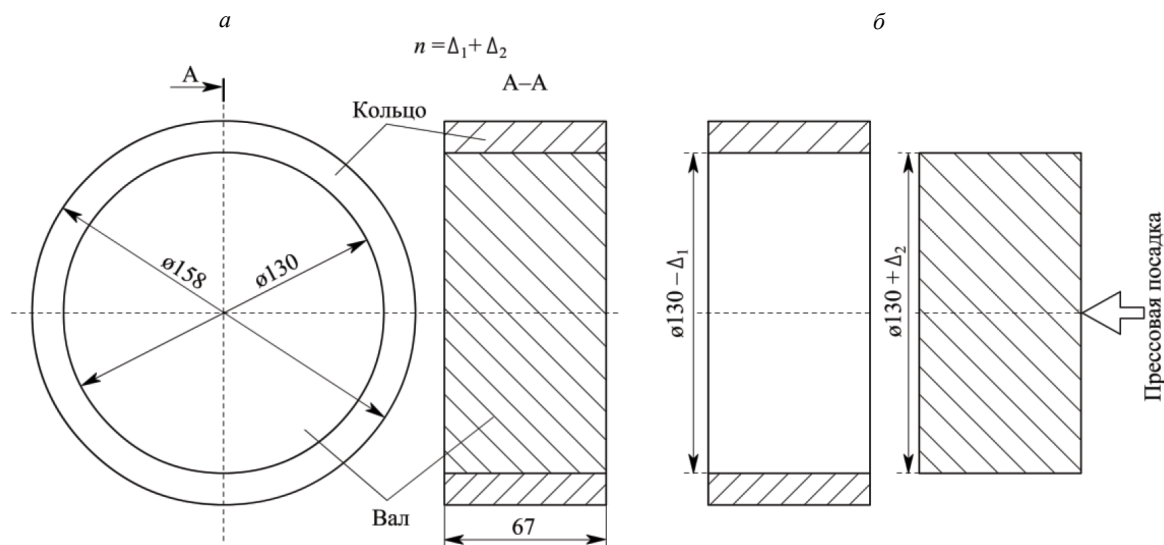
Рис. 2. Эскиз образцов соединений кольца с осью с натягом *n* после (а) и до (б) прессовой посадки.

Таблица 1

Объекты испытаний

Номер образца	Качественная характеристика	Натяг, мкм	Максимальное усилие запрессовки, кН
1	Образец с «большим» натягом	118	10,4
2	Образец с «большим» натягом	105	10,5
3	Образец со «средним» натягом	67	7,1
4	Образец со «средним» натягом	65	3,7
5	Образец с «малым» натягом	38	6,3
6	Образец без натяга	—	—
7	Свободное кольцо	—	—

В процессе прессовой посадки контролировали максимальную силу запрессовки кольца на вал. Результаты измерения натяга и силы запрессовки образцов приведены в табл. 1. Корреляция максимального усилия запрессовки с натягом составила более 98 %, коэффициент пропорциональности, определенный методом наименьших квадратов, составил 0,071 кН/мкм. В контрольную группу входили также образец без натяга с зазором (20—40) мкм и свободное кольцо.

Испытываемые образцы устанавливали на свободное кольцо, выполняющее роль подставки, таким образом, чтобы обеспечить их устойчивое положение с четырьмя точками опоры (рис. 3). В верхней части кольца размещали фиксаторы, необходимые для постоянства положения нагревательного элемента на цилиндрической поверхности кольца. Тепловое воздействие осуществляли двумя типами нагревателей: стальным бруском 95×9×9 мм массой 0,057 кг и латунным цилиндром Ø55×80 мм массой 1,2 кг. На латунном цилиндре часть поверхности шлифовали таким образом, чтобы контакт с кольцом подшипника был аналогичен контакту стального бруска. Брусек и цилиндр предварительно нагревали до температуры (200±2) °С. Запас тепловой энергии стального бруска составил 4,2 кДж, латунного цилиндра — 81 кДж.

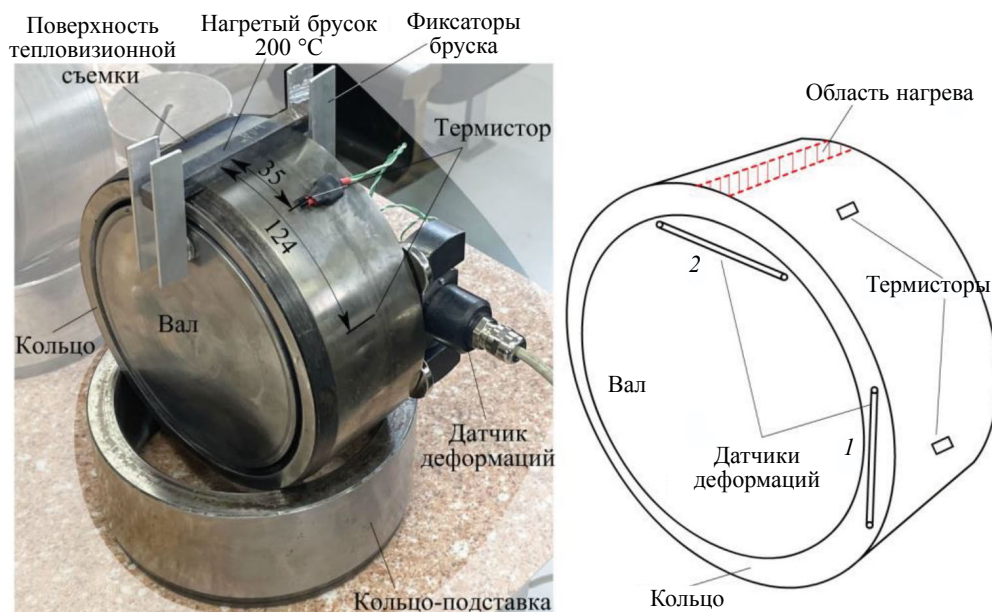


Рис. 3. Схема испытаний: образец прессового соединения с датчиком деформаций, термистором и нагревающим бруском (а); места измерения температуры и деформаций (б).

Для измерения температуры контактным способом на цилиндрической поверхности кольца на расстоянии 35 и 124 мм (1/4 окружности) закрепляли цифровой термистор с частотой дискретизации 1 Гц и ценой наименьшего разряда $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Часть цилиндрической поверхности кольца предварительно окрашивали черной матовой краской (рис. 3а). В процессе испытаний тепловизионной камерой регистрировали распределение температуры через каждые 20 с. Инфракрасный тепловизор Testo 875-1i обеспечивал бесконтактное измерение температуры с погрешностью ± 2 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\pm 2\%$ свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с температурной чувствительностью $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Деформации поверхности кольца измерялись оптико-поляризационным датчиком деформаций [31] с частотой дискретизации 50 Гц (см. рис. 3). Уникальность используемого датчика [32] заключалась в высокой чувствительности, нереализуемой традиционными средствами тензометрии. Цена наименьшего разряда аналогоцифрового преобразователя составляла $0,013\text{ мкм}$. Датчик с базой 60 мм обеспечивал измерения деформаций с погрешностью не более 4×10^{-7} относительных единиц деформаций.

В работе использовали две измерительные схемы. В первой схеме датчик крепили с помощью неодимовых магнитов на торец кольца подшипника на расстоянии 1/4 окружности кольца от области нагрева (см. поз. 1 рис. 3), во второй схеме — на вал непосредственно под областью нагрева (см. поз. 2 рис. 3).

Моделирование тепловых и механических процессов в кольцах и прессовых соединениях было выполнено методом конечных элементов с разбиением на восемь тысяч тетрагональных элементов с размерами от 0,5 до 7 мм. Натяг изменяли в диапазоне от 5 до 110 мкм, а коэффициент трения пары кольцо—вал — от 0,01 до 0,15. Механические и тепловые свойства материала кольца и вала приняты одинаковыми и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физические свойства материала кольца и вала

Плотность, кг / м ³	Модуль упругости, Е, ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °С)	Удельная теплоемкость, Дж / (кг · °С)	Коэффициент линейного расширения, 1/°С
7826	215	0,3	49	480	$12 \cdot 10^{-6}$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Тепловая энергия передается от нагревателя цилиндрической поверхности кольца за счет теплопередачи. Температура, измеренная на поверхности кольца подшипника на расстоянии 35 мм от нагревателя, в первые 200 с монотонно возрастает (рис. 4а). Тепловая энергия в кольце подшипника также распространяется за счет теплопроводности. Максимальное изменение температуры в

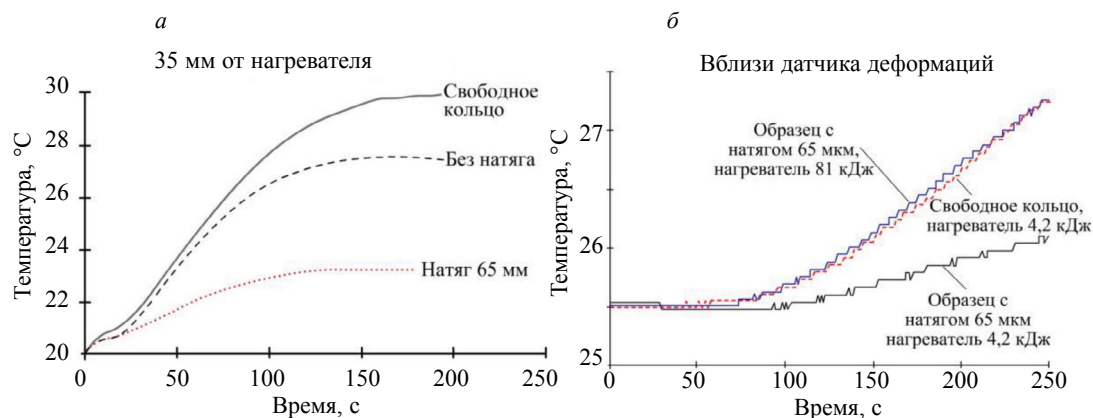


Рис. 4. Зависимость температуры от времени при испытаниях на расстоянии от нагретого бруска 35 мм (а) и 124 мм (б) рядом с датчиком деформаций.

кольцах, напрессованных на вал с натягом, в три раза меньше изменения температуры в свободном кольце. Отсутствие натяга также оказывает влияние на условие теплопередачи соединения кольцо—вал. В образце с зазором изменение температуры на поверхности кольца в 2,5 раза превышает изменение на образцах с натягом (рис. 4а). Вблизи датчика деформаций изменение температуры по уровню $0,06^\circ\text{C}$ наблюдается с задержкой около 60 с (рис. 4б), при этом приращение температуры за первые 200 с не превышает $0,6^\circ\text{C}$.

Повышение энергоемкости нагревателя почти в 20 раз и теплопроводности в 2 раза увеличивает продолжительность нагрева и абсолютную величину потока тепловой энергии. По-видимому, это связано с большими максимальными значениями градиентов температур (см. рис. 4б), которые, в свою очередь, определяют приращение механических деформаций и напряжений материала объекта контроля.

Анализ термограмм поверхности кольца (рис. 5) показывает уменьшение температуры нагревателя с 200 до 60°C за первые 100 с. Градиент температуры прямо пропорционален тепловому потоку, который в первые 25—30 с на расстояниях больше 50 мм от нагревателя не превышает цены наименьшего разряда тепловизора $0,05^\circ\text{C}$. Пространственное распределение температуры в начальный момент имеет прямоугольную форму и «расплывается» с течением времени со скоростью не более $1,5\text{ мм/с}$.

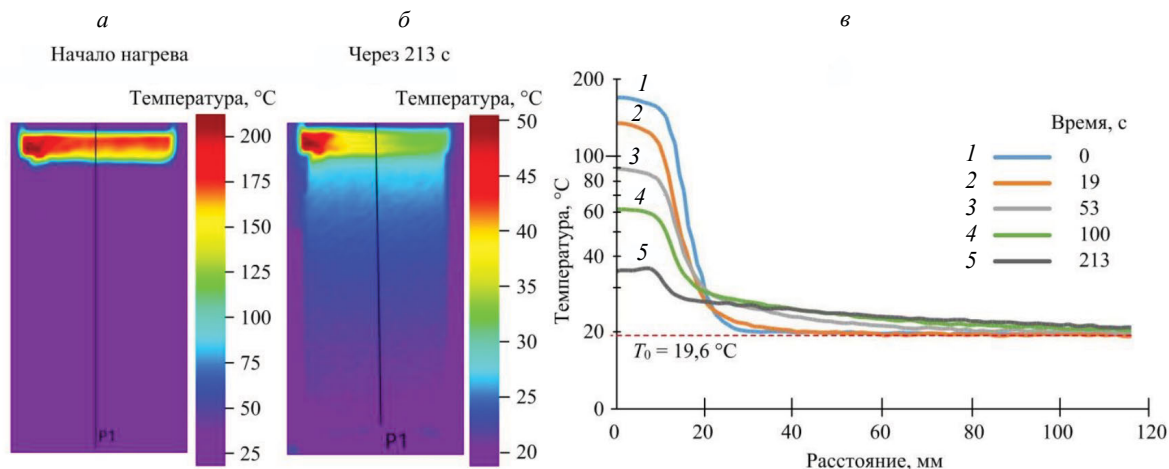


Рис. 5. Термограммы поверхности кольца через 20 с (а) и через 80 с (б) после начала нагрева и температурные профили в полулогарифмическом масштабе (в).

Необходимым условием реализации тензометрии при тепловом нагружении объекта является разделение во времени зоны нагрева и зоны измерения деформаций объекта. Это позволяет в процессе нагрева локальной области реализовать механическое нагружение, а упругие деформации зарегистрировать в ненагретой области. Данное условие выполняется на начальном этапе до 100 с от начала нагрева.

Временные зависимости деформаций свободного кольца подшипника и образца без натяга, измеренные датчиком поз. 1 на рис. 3б, при тепловом воздействии содержат два экстремума: один локальный максимум и один локальный минимум (рис. 6а). Здесь и далее положительные деформации соответствуют растяжению материала кольца, отрицательные — сжатию. На кольцах с прессовой посадкой с натягом больше 38 мкм первый положительный максимум деформаций отсутствует. Установленный эффект может быть использован для обнаружения прессовых соединений с неплотным прилеганием кольца к валу, наличием зазора между частью поверхности кольца и вала.

Результаты конечно-элементного моделирования (рис. 7) качественно подтверждают экспериментальные данные (см. рис. 6). При локальном тепловом воздействии на поверхность кольца (рис. 7в, г) однозначно идентифицируются три этапа деформирования. На первом начальном этапе наблюдается неравномерное распределение температуры кольца по толщине (рис. 7б). При этом тепловое воздействие создает эквивалентный момент силы M . Кольцо приобретает эллипсность, при которой в одном сечении размер уменьшается, а в другом — увеличивается. Это вызывает

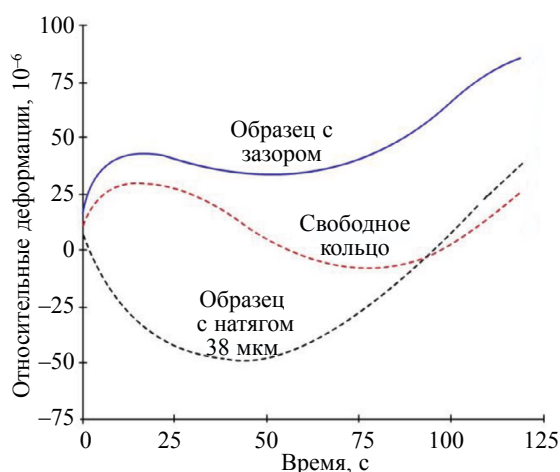


Рис. 6. Временные зависимости деформаций кольца подшипника, измеренные датчиком поз. 2 рис. 3б, при испытаниях свободного кольца, образца без натяга и образца с натягами.

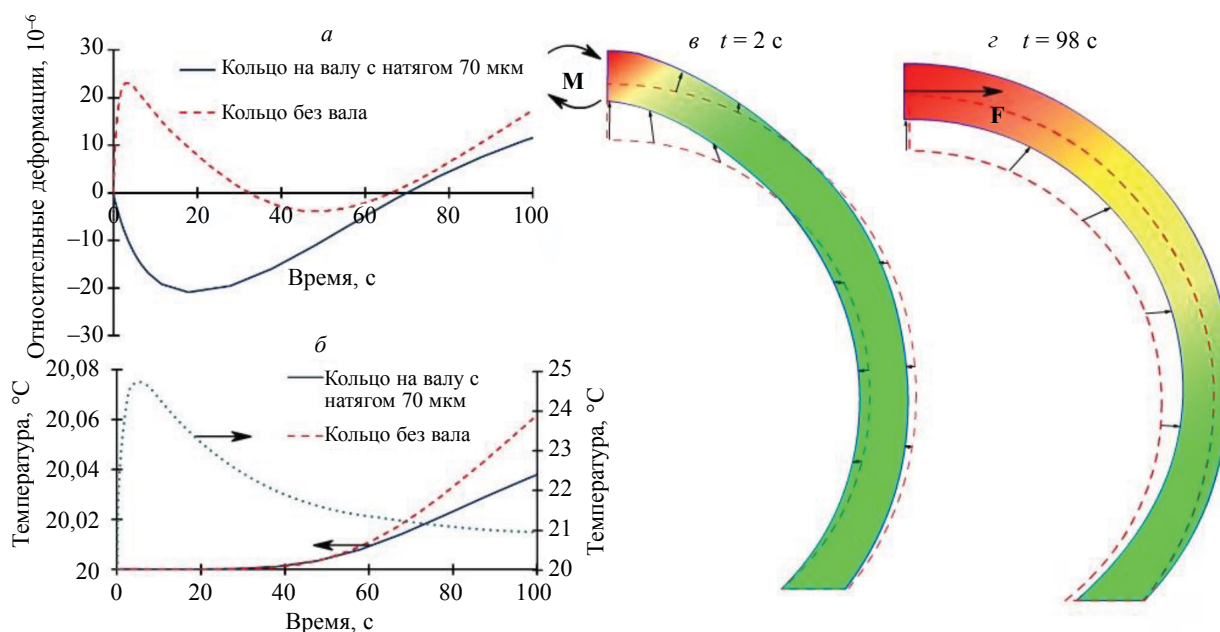


Рис. 7. Результаты моделирования методом конечных элементов свободного кольца подшипника и прессового соединения с натягом: зависимости деформаций (а) и температуры (б) от времени, форма свободного кольца и температурное поле через 2 с (в) и 98 с (г) после начала нагрева.

повышение показаний датчика деформаций на свободных кольцах и образцах с зазором. На образцах с натягом этот этап отсутствует, так как вал ограничивает уменьшение диаметра кольца.

На втором этапе (см. рис. 7г) температура кольца по толщине распределена достаточно равномерно и основной градиент температур направлен по окружности кольца, что эквивалентно нагружению горизонтальной силой F (см. рис. 7г). При этом датчик регистрирует уменьшение деформаций. На последнем третьем этапе линейные размеры кольца увеличиваются в результате теплового расширения. Рассчитанные временные зависимости относительных деформаций (рис. 7а) и температуры (см. рис. 7б) соответствуют экспериментальным результатам (см. рис. 6).

Связь параметров сигналов деформаций (рис. 8) с натягами образцов исследовали экспериментально по схеме, в которой датчик деформаций устанавливали на вал непосредственно под нагреваемым участком кольца (см. поз. 2 рис. 3). Полученные зависимости интерпретировали в рамках

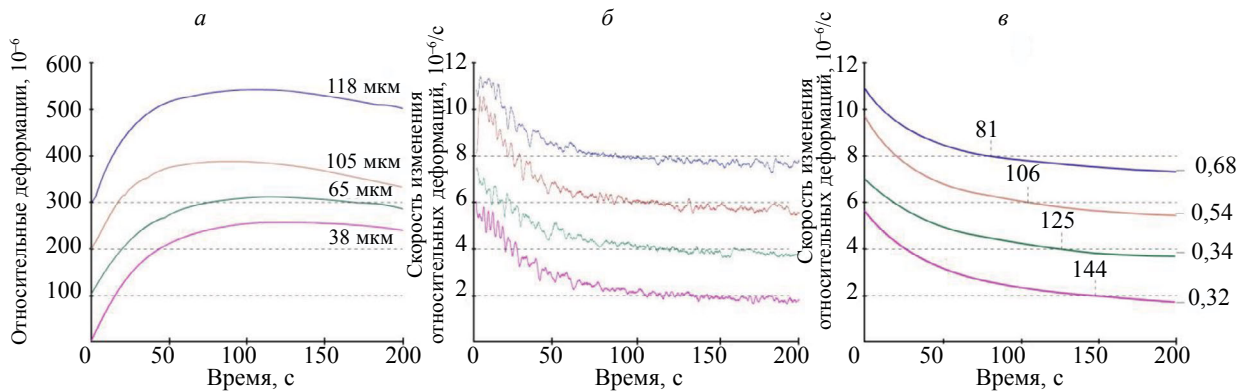


Рис. 8. Временные зависимости деформаций (а) валов прессовых соединений с различными натягами, измеренные датчиком поз. 2 рис. 3б, и скорости изменения деформаций, усредненные на интервале 2 с (б) и 50 с (в).

плоской модели. Анализируются только деформации и напряжения в плоскости боковой поверхности кольца и вала. Особенность рассматриваемой задачи термоупругих деформаций связана с импульсным воздействием теплового источника и неосесимметричным распределением температуры. Квазистатическое решение предполагает, что скорость распространения деформаций, вызванных действиями внешних сил, значительно выше скорости деформаций в точке измерения, вызванных изменением температуры в этой точке.

При тепловом воздействии на элемент кольца локальные изменения температуры ΔT создают деформации во всем образце, которые эквивалентны действиям в нагретом элементе материала объемных сил: радиальных и касательных. Деформации вала во времени развиваются немонотонно (см. рис. 8). На начальном этапе нагрева регистрируется растяжение вала, затем на интервале от 80 до 145 с наблюдается локальный максимум и снижение уровня деформаций на 5—10 % (рис. 8а). Уменьшение деформаций связано со уменьшением градиента температуры из-за остывания нагревателя.

Для оценки временных параметров сигналов деформаций рассчитана их скорость изменения в скользящем окне длительностью 2 с (рис. 8б) и 50 с (рис. 8в). Временная зависимость скорости деформаций (рис. 8б) содержит нестационарные пульсации, которые наблюдаются только в области высоких значений скорости изменения деформаций. На интервале от 80 до 145 с, где скорость близка к нулю и, следовательно, изменения напряжений в материале кольца не происходит, амплитуда пульсации не превышает 10 % их максимального значения. Пульсации скорости отражают дискретный характер локального «проскальзывания» кольца и вала, когда напряжение на границе превышает силы трения.

Время достижения максимума деформаций определяли по изменению знака скорости (см. рис. 8в), рассчитанной в скользящем окне длительности 50 с, что позволило сгладить пульсации. Эти времена коррелируют с натягами прессовых соединений с коэффициентом корреляции 0,97 и коэффициентом пропорциональности — 0,71 мкМ/с. В образцах с высокими значениями натяга реализуются большие значения нормальных напряжений и напряжений трения на границе соединения. В этих условиях для деформирования вала в таких прессовых соединениях требуются более высокие градиенты температуры. Поэтому процессы деформирования вала останавливаются при снижении градиента температуры, связанном с исчерпанием запаса тепловой энергии нагревателя.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования динамики развития механических напряжений в упругой среде методами тензометрии при локальном импульсном тепловом воздействии доказывают возможность решать задачи контроля остаточных внутренних напряжений сопряженных поверхностей тел вращения. Экспериментально установлено, что зазор в прессовом соединении оказывает значительное влияние на распределение деформаций в кольце подшипника и их временные зависимости. В прессовых соединениях с плотной посадкой на начальном этапе материал вне зоны

нагрева сжимается, локальные деформации отрицательные, а в соединениях с зазором — растягивается, деформации положительные. Обоснована корреляция времени достижения максимума деформаций вала с натягом прессового соединения с коэффициентом корреляции, равным 0,97.

Достоверность контроля прессовых соединений напрямую зависит от возможности разделения локальных температурных деформаций в месте установки датчика и деформаций объекта, связанных с градиентом температур в области нагрева. Экспериментально-расчетным способом показана возможность пространственного разделения зон теплового воздействия и измерения деформаций за счет достаточно медленной скорости распространения теплового потока.

Необходимым условием организации контроля прессовых соединений является создание в объекте необходимого градиента температуры и соответствующего ему уровня нормальных и касательных деформаций на границе соединения. Связь регистрируемых деформаций с натягом может быть установлена только при условии, что напряжения превышают начальные нормальные напряжения на границе соединения и напряжения трения, вызванные прессовой посадкой.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на численное решение обратной задачи о деформировании прессового соединения для оптимизации способа нагрева и выбора оптимальной области измерения деформаций, исследования дискретных процессов, возникающих при трении сопряженных поверхностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carpenter Chris*. Fatigue Testing of Shrink-Fit Couplings for Joining High-Strength-Steel Riser Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 2015. V. 65. P. 108—111.
2. Безъязычный В.Ф., Федулов В.М. Методика технологического обеспечения эксплуатационных показателей при сборке соединений с натягом // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2020. № 6. С. 270—276.
3. Hehe Kang, Zhi-Min Li, Tao Liu, Guang Zhao, Jianping Jing, Wei Yuan. A novel multiscale model for contact behavior analysis of rough surfaces with the statistical approach // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. V. 212.
4. Kogu Lior, Etsion Izhak. A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces // *Tribology Transactions*. 2003. V. 46. No. 3. P. 383—390.
5. Кулиев С.А., Мамедов А.Ф. Определение напряжений в ступице соединения с натягом при нагружении // *Вестник машиностроения*. 2019. № 7. С. 27—30.
6. Рожкова Е.А., Четвериков С.В. Методика проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния профильных соединений с натягом // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19. № 1. С. 46—58.
7. Мамедов, А. Ф. Расчет соединения с натягом на ударную нагрузку // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 4. С. 85—87.
8. Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н. Методы повышения эффективности контроля затяжки резьбовых соединений // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 7. С. 40—42.
9. Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F. Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account // *Materials & Design*. 2011. V. 32. No. 7. P. 3692—3701.
10. Wang X., Lou Z., Wang X., Wang Y., Hao X., Wang Z. Automatic press-fit assembly of small precision interference fitting parts: armature of electro-hydraulic servo valve // *Assembly Automation*. 2019. V. 39. No. 5. P. 986—998.
11. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Hrinchenko H. Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints // *Advanced Manufacturing Processes V*. 2023. V. 10.
12. Bedlaoui Allal, Boutoutaou Hamid. Effect of interference and form defect on the cohesion of the shrink-fit assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. V. 128.
13. Букеткин Б.В., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Релаксация напряжений в болтовых соединениях с радиальным натягом // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2019. № 10 (94). С. 1.
14. Arslan M.A. Coupled thermal/structural contact analyses of shrink-fit tool holder // *Journal of Engineering Manufacture*. 2014. V. 228 (5). P. 715—724.
15. Wang X., Lou Z., Wang X., Hao X., Wang Y. Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. V. 233 (8). P. 2834—2846.
16. Saeedi R., Sadeghi M. Investigation of insert-hole interference fit influence on downhole drilling bit failure // *Journal of Engineering Manufacture*. 2020. V. 234 (14). P. 1752—1761.

17. *Santus C.* Initial orientation of the fretting fatigue cracks in shrink-fit connection specimens // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. V. 13(48). P. 442—450.
18. *Saeed Muhammad, Falter Jan, Dausch Valesko, Wagner Markus, Kreimeyer Matthias, Eisenbart Boris.* Artificial intelligence techniques for improving cylindrical shrink-fit shaft-hub couplings // *Proceedings of the Design Society*. 2023. V. 3. P. 645—656.
19. *Zhou D., Lan S., Gao X. et al.* Nondestructive Surface Threshold Definition for Remanufacturing Disassembly of Interference Fit // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2018. V. 19. P. 1735—1743.
20. *Bo You, Zhifeng Lou, Yi Luo, Yang Xu, Xiaodong Wang.* Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2015. V. 2015. P. 10.
21. *Матлин М.М., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А., Мозгунова А.И.* Устройство для определения давления в соединении с натягом // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018. № 9 (219). С. 80—83.
22. *Yang Liu, Mingxuan Li, Xiaofeng Lu, Qingsheng Li, Xiaolei Zhu.* Pull-out performance and optimization of a novel Interference-fit rivet for composite joints // *Composite Structures*. 2021. V. 269.
23. *Wang Xingyuan, Liu Jiaxing, Lu Shujie, Wang Yue, Wang Xiaodong, Lou Zhifeng, Zhang Lixun.* Connection force measurement of precision small interference components using ultrasound // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023.
24. *Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48—57.
25. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гуцина Л.В.* Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.
26. *Бехер С.А., Степанова Л.Н., Рыжова А.О., Бобров А.Л.* Контроль натяга колец подшипников поверхностными волнами с использованием эффекта акустоупругости // *Дефектоскопия*. 2021. № 4. С. 13—21.
27. *Буйносов А.П., Ветлугина О.И., Гузенкова Е.А.* Разработка ультразвукового способа контроля натяга бандажа на ободе колесного центра при насаженных бандажах // *Наука и образование транспорта*. 2022. № 1. С. 13—15.
28. *Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8.
29. *Król Roman, Siemiątkowski Zbigniew.* The analysis of shrink-fit connection – the methods of heating and the factors influencing the distribution of residual stresses // *Heliyon*. 2019. V. 5. No. 11.
30. *Wu X., Li C., Sun S., Tong R., Li Q.* A Study on the Heating Method and Implementation of a Shrink-Fit Tool Holder // *Energies*. 2019. No. 12.
31. *Федорин В.Н., Сидоров В.И.* Поляризационные оптические датчики для измерения физических величин // *Журнал аналитической химии*. 2005. Т. 55. № 7.
32. *Федорин В.Н., Бехер С.А., Выплавень В.С.* Оптическая тензометрия в задаче взаимодействия колеса-рельс // *Автометрия*. 2023. Т. 59. № 3. С. 33—42.

REFERENCE

1. *Carpenter Chris.* Fatigue Testing of Shrink-Fit Couplings for Joining High-Strength-Steel Riser Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 2015. V. 65. P. 108—111.
2. *Bezyazychnyj V.F., Fedulov V.M.* The methodology of technological support of operational indicators in the assembly of joints with tension // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2020. № 6. P. 270—276.
3. *Hehe Kang, Zhi-Min Li, Tao Liu, Guang Zhao, Jianping Jing, Wei Yuan.* A novel multiscale model for contact behavior analysis of rough surfaces with the statistical approach // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. V. 212.
4. *Lior Kogu, Izhak Etsion.* A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces // *Tribology Transactions*. 2003. V. 46. No. 3. P. 383—39.
5. *Kuliev S.A., Mamedov A.F.* Determination of stresses in the connection hub with tension during loading // *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. No. 7. P. 27—30.
6. *Rozhkova E.A., Chetverikov S.V.* The method of conducting experimental studies of the stress-strain state of profile joints with tension // *Vestnik Rossijskogo universiteta družby` narodov. Seriya: Inzhenerny`e issledovaniya*. 2018. V. 19. No. 1. P. 46—58.
7. *Mamedov A.F.* Calculation of the connection with tension to the shock load // *Problemy` mashinostroeniya i avtomatizacii*. 2019. No. 4. P. 85—87.
8. *Matlin M.M., Kazankin V.A., Kazankina E.N.* Methods for improving the effectiveness of tightening control of threaded connections // *Ximicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2020. № 7. P. 40—42.

9. *Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F.* Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account // *Materials & Design*. 2011. V. 32. No. 7. P. 3692—3701.
10. *Wang X., Lou Z., Wang X., Wang Y., Hao X., Wang Z.* Automatic press-fit assembly of small precision interference fitting parts: armature of electro-hydraulic servo valve // *Assembly Automation*. 2019. V. 39. No. 5. P. 986—998.
11. *Kupriyanov O., Trishch, R., Dichev D., Hrinchenko H.* Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints // *Advanced Manufacturing Processes* V. 2023. V. 10.
12. *Bedlaoui Allal, Boutoutaou Hamid.* Effect of interference and form defect on the cohesion of the shrink-fit assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. V. 128.
13. *Buketkin B.V., Semenov-Ezhov I.E., Shirshov A.A.* Stress relaxation in bolted joints with radial tension // *Inzhenerny'j zhurnal: nauka i innovacii*. 2019. № 10 (94). P. 1.
14. *Arslan M.A.* Coupled thermal/structural contact analyses of shrink-fit tool holder // *Journal of Engineering Manufacture*. 2014. V. 228 (5). P. 715—724.
15. *Wang X., Lou Z., Wang X., Hao X., Wang Y.* Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. V. 233(8). P. 2834—2846.
16. *Saeedi R., Sadeghi M.* Investigation of insert-hole interference fit influence on downhole drilling bit failure // *Journal of Engineering Manufacture*. 2020. V. 234 (14). P. 1752—1761.
17. *Santus C.* Initial orientation of the fretting fatigue cracks in shrink-fit connection specimens // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. V. 13 (48). P. 442—450.
18. *Saeed Muhammad, Falter Jan, Dausch Valesko, Wagner Markus, Kreimeyer Matthias, Eisenbart Boris.* Artificial intelligence techniques for improving cylindrical shrink-fit shaft-hub couplings // *Proceedings of the Design Society*. 2023. V. 3. P. 645—656.
19. *Zhou D., Lan S., Gao X. et al.* Nondestructive Surface Threshold Definition for Remanufacturing Disassembly of Interference Fit // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2018. V. 19. P. 1735—1743.
20. *Bo You, Zhifeng Lou, Yi Luo, Yang Xu, Xiaodong Wang.* Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2015. V. 2015. P. 10.
21. *Matlin M.M., Kazankina E.N., Kazankin V.A., Mozgunova A.I.* Device for determining pressure in connection with tension // *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 9 (219). P. 80—83.
22. *Yang Liu, Mingxuan Li, Xiaofeng Lu, Qingsheng Li, Xiaolei Zhu.* Pull-out performance and optimization of a novel Interference-fit rivet for composite joints // *Composite Structures*. 2021. V. 269.
23. *Wang Xingyuan, Liu Jiaying, Lu Shujie, Wang Yue, Wang Xiaodong, Lou Zhifeng, Zhang Lixun.* Connection force measurement of precision small interference components using ultrasound // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2023.
24. *Muraveva O.V., Volkova L.V., Muravev V.V.* Sensitivity of the electromagnetic-acoustic multiple shadow method using Rayleigh waves in the control of oil grade pipes // *Defektoskopiya*. 2020. No. 12. P. 48—57.
25. *Muravev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Buldakova I.V., Gushhina L.V.* Studies of the structural and stress-strain state of rails of current production by the method of acoustoelasticity // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2018. V. 21. No. 2. P. 13—23.
26. *Bekher S.A., Stepanova L.N., Ry'zhova A.O., Bobrov A.L.* Control of bearing ring tension by surface waves using the acoustoelasticity effect // *Defektoskopiya*. 2021. No. 4. P. 13—21.
27. *Buinosov A.P., Vetlugina O.I., Guzenkova E.A.* Development of an ultrasonic method for monitoring the tension of the bandage on the rim of the wheel center with the bandages attached // *Nauka i obrazovanie transportu*. 2022. No. 1. P. 13—15.
28. *Buldakova I.V., Volkova L.V., Muravev V.V.* Stress distribution in pipe samples of main gas pipelines with welded connection // *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2020. V. 18. № 1. P. 4—8.
29. *Król Roman, Siemiatkowski Zbigniew.* The analysis of shrink-fit connection – the methods of heating and the factors influencing the distribution of residual stresses // *Heliyon*. 2019. V. 5, No. 11.
30. *Wu X., Li C., Sun S., Tong R., Li Q.* A Study on the Heating Method and Implementation of a Shrink-Fit Tool Holder // *Energies*. 2019. No. 12.
31. *Fedorinin V.N., Sidorov V.I.* Polarizing optical sensors for measuring physical quantities // *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2005. V. 55. No. 7.
32. *Fedorinin V.N., Bekher S.A., Vyplaven V.S.* Optical strain gauge in the problem of wheel-rail interaction // *Avtometriia*. 2023. V. 59. No. 3. P. 33—42.