

В. К. Гончарук, Н. Ю. Зайко, А. А. Ратников, К. К. Шелковников

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА СТЕКЛА И АЛЮМИНИЯ В СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Аннотация.** При создании стекло-металлических соединений, в том числе нового конструкционного материала стеклометаллокомпозиата, используется способность стекла надежно соединяться с металлами при определенном уровне температур стекла и металла. Адгезия горячего стекла тесно связана с физико-химическими процессами, протекающими на границе раздела «стекло – металл». Соединение зависит от температуры металлических обшивок и расплава стекла, времени выдержки, давления, состава стекла и металла. В данной работе экспериментально исследуется влияние технологических параметров центробежного литья на прочностные свойства конструкционного элемента стеклометаллокомпозиата, как результата контактного взаимодействия слоев, сила сцепления которых определяет основные механические свойства соединения. Предлагается экспериментальный метод определения адгезионной силы при исследовании конструктивных цилиндрических образцов стеклометаллокомпозиата на сдвиг.

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, стеклометаллокомполит, адгезионная сила, стекло-металлическое соединение.

DOI: 10.37972/chgpu.2023.58.4.003

УДК: 531.534

---

© Гончарук В. К., Зайко Н. Ю., Ратников А. А., Шелковников К. К., 2023

*Гончарук Владимир Кириллович*

**e-mail:** gon@ich.dvo.ru, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией оптических материалов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия.

*Зайко Надежда Юрьевна*

**e-mail:** golobokovanu@dvvu.ru, старший преподаватель Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

*Ратников Александр Александрович*, заведующий лабораторией компьютерного моделирования, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

*Шелковников Константин Константинович*

**e-mail:** shelkovnikov.kk@dvvu.ru, аспирант департамента морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

Поступила 01.12.2023

**Введение.** Исследования контактного взаимодействия тел цилиндрической формы сохраняют теоретическую и прикладную актуальность, которая связана не только с тем, что полый цилиндр является наиболее распространенной деталью в машиностроении, но и с новыми видами материалов используемыми в современной промышленности для цилиндрических деталей. Развитие индустрии композиционных материалов обозначает ряд проблем из которых проблема моделирования и экспериментального исследования контактного взаимодействия слоев является основной особенной при проектировании слоистых композитов с материалами слоев существенно различающихся по физико-механическим свойствам. Безусловно к таким материалам относится новый композиционный материал на основе стекла и металла - стеклометаллокомпозит (рис. 1а), перспективы его применения изложены в работах [1–3], а основные результаты исследований в работах [4–6]. При создании стеклометаллокомпозита используется способность стекла надежно соединяться с металлами при определенном уровне температур стекла и металла [3]. Стеклометаллокомпозит является принципиально новым конструкционным материалом, не имеющим аналогов в мире. Стекло теоретически обладает огромными прочностными свойствами. Но на практике его прочность намного меньше из-за микротрещин на поверхности стекла (рис. 1б). Зависимость прочности соединения для некоторых стекол с металлами от температуры материалов и геометрии поверхности металла исследована в работе [7]. В работах [7–9] исследована связь между температурой прилипания и вязкостью стекломассы установлено, что адгезия стекла к металлу находится в прямой зависимости от степени предварительного нагрева стекла и металла (Рисунок 1с). Для борьбы с усадкой стеклообразователя технология изготовления СМК предусматривает использование дополнительного давления. При осуществлении процесса стеклования под давлением наблюдается переход стекла в более твердое аморфное состояние. При этом достигается уплотнение силикатного стекла на 10 % и даже выше, а плотность стекла по плотности приближается к кристаллическим формам. Это означает, что в процессе уплотнения появляется иной механизм молекулярной подвижности, чем при размягчении стекла. Для релаксации напряжений в СМК и стабилизации физико-механических свойств стеклянного слоя производится отжиг оболочки при температуре стеклования. Все существующие количественные сведения о протекании процессов релаксации и стабилизации физико-механических свойств стекла при отжиге получены на основе анализа температурно-временных зависимостей свойств стеклообразующих жидкостей. Показано, что при фиксированной структуре процесс релаксации характеризуется сравнительно небольшими временами релаксации и энергией активации, и этот процесс главным образом отвечает за релаксацию напряжений в стекле в интервале стеклования. При вязкости стекломассы, превышающей 1016–1017 Па·с, время релаксации становится настолько большим, что при решении практических задач структуру стекла можно считать стабильной, не изменяющейся во времени. Технология изготовления стеклометаллокомпозита требует обеспечения надежного соединения стеклянного слоя с металлическими обшивками [1–3]. Это означает, что температура обшивок в момент контакта с расплавом стекла должна составлять 500–750° С в зависимости от состава стекла и используемого металла. Температурные напряжения в стеклометаллокомпозите, даже при условии равномерного распределения температуры являются в первую очередь следствием разных механических и физико-химических свойств материалов, из которых выполнены сопряженные элементы или слои. В механике контактного взаимодействия контакт упругого

бандажа с упругим цилиндром исследованы в монографии [10]. Осесимметричная контактная задача обжатия длинного круглого цилиндра насаженным с натяжением упругим кольцом рассмотрена в [11]. Получена формула, определяющая контактное давление в зависимости от величины натяжения. Результаты исследования контакта с зазором цилиндра и обоймы приведены в монографии [12], внешний контакт пары вращающихся круговых цилиндров с учетом тепловыделения от действия сил трения рассмотрен в [13]. В работе [14] исследована упругая, а в [15] — термоупругая при стационарном тепловыделении задача обжатия длинного цилиндра упругим, обеспечивающего начальный ненагруженный контакт тел по поверхности кольца или по контуру окружности. В тоже время существенное влияние на общую картину температурных напряжений оказывают свойства сопряжения разнородных материалов и тип полученного соединения: склейка, сварка, или горячая посадка; идеальный контакт, свободное или частичное проскальзывание в разных направлениях. В работах [4, 16] предложено феноменологическое условие и метод математического моделирования совместного деформирования соосных цилиндров при разных условиях сопряжения по боковым поверхностям: от свободного проскальзывания вдоль оси до идеального контакта, с учетом частичного (ограниченного) проскальзывания. В данной работе, в том числе ставится задача разработки экспериментального метода, позволяющего оценить контакт слоев, за счет силы сопротивления при сдвиге. Разрабатываемый метод должен позволять также оптимизировать технологические процессы, выбора толщины оболочки металлического слоя, метода химической обработки поверхности, как инструмента влияния на адгезионные характеристики и температурный режим. В работе рассматривается влияние технологических параметров центробежного литья на прочностные свойства диффузионный слой, возникающего в процессе изготовления СМК. При этом поставлена задача проведения испытаний изготовленных цилиндрических образцов СМК на сдвиг.

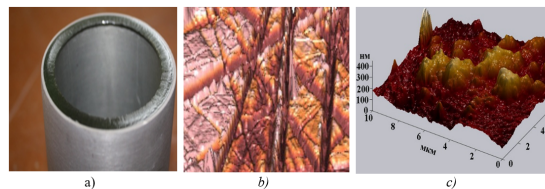


Рис. 1. а) Образец СМК, б) Микротрещины на поверхности стекла. в) Вид контактной зоны после разрыва слоев

### 1. Метод, материалы и результаты экспериментальных исследований.

Целью испытаний на сдвиг является определение максимального касательного напряжения, являющегося пределом прочности соединения металлической облицовки со стеклом, которое может возникнуть в диффузионном слое между стеклом и металлом. Для сдвиговых испытаний были изготовлены образцы, представляющие из себя трубку из АМг-2 длиной от 20 до 40 мм, внутренним диаметром 16, 20 и 24 мм и наружным 40 мм с залитым внутрь расплавом стекла каждого из трёх выбранных составов. АМг2 — это сплав алюминия системы Алюминий — Магний (Al — Mg), который относится к числу деформируемых давлением сплавов. Помимо этого, данный

материал выделяется среди прочих высокой коррозионной стойкостью, пластичностью и хорошей свариваемостью. По прочности он превосходит АМц, но уступает ему в пластичности. Теплопроводность же и электропроводность этого материала ниже, чем у алюминий-марганцевого сплава. В этой связи интересно продемонстрировать, сравнительную гистограмму, на которой изображены предел прочности и текучести разных сплавов алюминия. И мы видим здесь, что АМг2 примерно равен по этим свойствам АМг3. Однако, коррозионная стойкость у АМг2, естественно выше. Химический состав АМг2 можно назвать сбалансированным. Содержание магния в нём не превышает 4 %, что положительным образом сказывается на пластичности, коррозионной стойкости и свариваемости данного материала. В то же время содержание Mg превышает 2 %, что положительным образом сказывается на прочности сплава. Для упрочнения соединения внутренняя поверхность алюминиевой трубы обрабатывалась одним из трех способов: заливка стекла “всухую”, то есть заливка в алюминиевую форму без предварительной обработки поверхности алюминия; заливка с предварительной обработкой внутренней поверхности алюминия порошком В2О3; заливка изнутри образца расплавленным В2О3, названные 0,1 и 2 соответственно. Испытания проводились на испытательной машине Shimadzu Autograph AGS-X series. Также были изготовлены Т-образный стальной поршень и железная трубка длиной 45 мм, внутренним диаметром 23 мм и наружным 38 мм, представлены на рис. 2. SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X SERIES универсальная настольная испытательная машина серии AGS-X предназначена для исследования на сжатие. Максимально допустимая нагрузка — 50 кН. Новые модели испытательных машин серии AGS-X позволяют провести испытания на высоком уровне, имеют интуитивно понятное управление и обеспечивают максимальную степень безопасности. Испытание материала на сжатие, проводится в программном обеспечении TRAPEZIUM. Также испытательные машины серии AGS-X могут работать автономно без подключения к ПК с использованием тестовых методик, созданных непосредственно на машине. В случае автономной работы (без подключения к ПК) управление испытательной машиной производится при помощи панели управления. Панель управления обеспечивает разработку и сохранение условий испытаний; джойстик панели управления позволяет управлять захватами или автоматическим экстензометром. Панель управления подвижна, что позволяет установить ее под удобным углом. Кроме того, высокоскоростная выборка данных (1 мс) гарантирует отсутствие пропусков в изменении прочности. Перед испытанием каждый образец вертикально устанавливался на железную трубку, предварительно поставленную на неподвижную подставку, сверху в стеклянный слой упирался Т-образный поршень, который сверху придавливался прессом испытательной машины. В ходе испытания столб стекла под давлением должен был оторваться от алюминиевой облицовки и постепенно выйти в железную трубку. На рис. 3 показаны готовые к испытаниям образцы из стекломаталлокомпозита.

После проведения испытаний, испытательной машиной выводились следующие данные: время, сила и ход. Используя значения силы и площади соприкосновения, вычислены нормальные напряжения на верхнем торце стеклянного слоя  $\sigma_B$  и нижнем торце алюминиевого слоя  $\sigma_H$  :

$$\sigma_B = \frac{F}{\pi * R_{cc}}, \quad (1)$$

$$\sigma_H = \frac{F}{\pi * R_o^2 - \pi * R_{cc}^2}, \quad (2)$$



Рис. 2. Устройства для выдавливания.

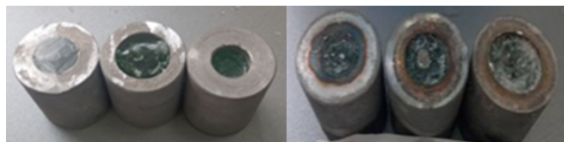


Рис. 3. Образцы для испытания.

где  $F$  - приложенная сила,  $R_{cc}$  - радиус стеклянного слоя,  $R_o$  - радиус всего образца. В таблице 1 представлены результаты вычислений. На графиках рис.4-5 представлены результаты некоторых образцов на графиках время-напряжение и сила-напряжение. Синяя линия обозначает нормальные напряжения на верхнем торце стеклянного слоя, красная – нормальные напряжения на нижнем торце алюминиевого слоя.

Вычисляя средние значения нормальных напряжений верхнего и нижнего торцов по технологиям заливки: мы можем видеть, что наибольшие напряжения испытывали образцы с технологией.

**2. Моделирование в CAE Ansys.** Так как данных с испытательной машины оказалось недостаточно для полной оценки прочности диффузионного слоя, была

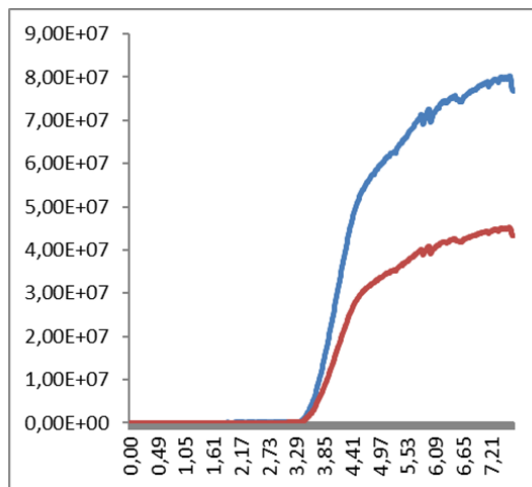


Рис. 4. Нормальные напряжения в образце 12.

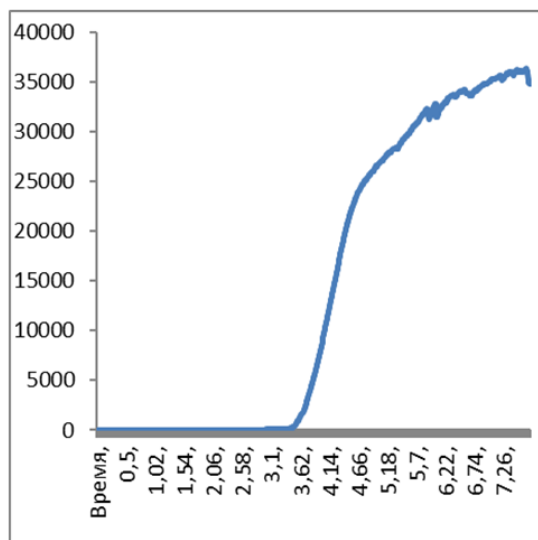


Рис. 5. Приложенная сила в образце 12.

создана компьютерная модель для расчетов в пакете программ Ansys. Для реализации данной задачи были выбраны два модуля: Transient Structural для моделирования выдержки образца и выдавливания и Explicit Dynamics для моделирования разрыва слоя стекла. Была построена геометрия моделей испытуемых образцов для двух модулей и созданы материалы Amg2, B2O3 для библиотеки Engineering Data. В Transient Structural выдавливание происходит с помощью функции Displacement на то расстояние, в котором значение силы с показателями Shimadzu является максимальным. Для учета температурных напряжений добавлена функция Thermal Condition

№ образца	Технология заливки	Среднее, верхний торец	Среднее, нижний торец	Средняя верхнего 450-565
1-6	0	106,78	31,90	93,60
7-14	1	88,31	37,46	89,65
15-20	2	141,45	43,43	88,43

Таблица 1. Средние значения напряжений

с указанием температуры выдержки, температура среды указана такая же. Выдержка происходит в течение 1-ой секунды. Для контакта между слоями был подобран тип контакта Frictional. При расчете в программе Ansys требовалось вычислить такой коэффициент трения, чтобы нормальные напряжения в программе совпадали с нормальными напряжениями самих образцов. В Ansys при типе контакта Frictional нормальная составляющая силы такая же, как и при контакте без трения. Чтобы сравнить результаты экспериментов, проведенных в устройстве Shimadzu и результаты моделирования в Ansys, были вычислены нормальные напряжения на верхнем торце стеклянного слоя и нижнем торце алюминиевого слоя, используя значения силы и хода из данных Shimadzu. Используя подобранный в Ansys коэффициент трения были вычислены силы трения на нижних и верхних торцах (табл. 2):

$$\sigma * U = F_1, \sigma * U = F_2, \quad (3)$$

№ образца	D, мм	$\sigma_1$ на верхнем торце, МПа	$\sigma_2$ на нижнем торце, МПа	$\mu$ , Коэфф. трения	$4F_1$ , Сила трения на верхнем торце	Среднее значение по технологии	$4F_2$ , Сила трения на нижнем торце	Среднее значение по технологии
4	16	156	29,5	0,24	37,44		8,99	7,23
6	20	137	45,6	0,2	27,40	27,40	5,48	
9	24	90	50,7	0,21	18,90	37,35	3,97	10,35
13	16	186	42	0,3	55,80		16,74	
15	20	121	40,4	0,35	42,35	66,00	14,82	29,75
16	16	157	29,9	0,4	62,80		25,12	
19	20	163	50	0,55	89,65		49,31	

Таблица 2. Вычисление силы трения

Средние значения сил трения показывают, что испытываемые напряжения у образцов с технологией заливки 2 выше, чем у образцов с технологией заливки 1. А у образцов с технологией заливки 0 меньше, чем у образцов с технологией 1. Сравнение результатов вычисления нормальных напряжений на нижнем торце в устройстве Shimadzu и в программе Ansys представлены в табл. 3.

№ образца	Напряжения на нижнем торце (Ansys), МПа	Напряжения на нижнем торце (Shimadzu), МПа	Коэффициент трения	Технология заливки
6	40	45,6	0,2	0
9	48,9	50,7	0,21	1
13	40	42	0,3	1
19	52	50	0,55	2

Таблица 3. Сравнение результатов компьютерного расчета и натуральных испытаний

**Заключение** Предварительные оценки показали, что наилучшие результаты достигаются на образцах, изготовленных при заливке расплава бора на поверхность алюминия перед стеклом. По результатам исследования наиболее эффективной является технология предварительной обработки поверхности алюминиевой трубы расплавом бора В2О3, что подтверждается на компьютерной модели испытаний. Построенная компьютерная модель может быть использована для определения геометрических размеров и параметров заливки для следующей серии испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пикуль В.В. Перспективы создания прочных корпусов глубоководной техники из стеклометаллокомпозиата // Судостроение. 2000. № 4. С. 14–16.
- [2] Пикуль В.В. Способ изготовления стеклометаллокомпозиата // Пат. № 2304117 РФ. 2007.
- [3] Пикуль В.В., Ратников А.А. Математическое моделирование деформирования цилиндрической оболочки из стеклометаллокомпозиата в процессе ее изготовления. № 3. 2007. С. 10–15.
- [4] Любимова О.Н. Стеклометаллокомполит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств: диссертация ... доктора физико-математических наук : 01.02.04. 2020.
- [5] Любимова О. Н., Морковин А. В. Свойства, макро- и микроструктура слоистого конструкционного элемента на основе неорганического стекла и стали - стеклометаллокомполитного стержня // Металлург. 2022. № 9. С. 100–104.
- [6] Бочарова А. А. Математическое моделирование процесса формирования прочного корпуса глубоководных аппаратов из стеклометаллокомполита. № 4. 2015. С. 18–23.
- [7] Алексеев М. П. Когезия и адгезия горячего стекла. 1969. 175 с.
- [8] Эйгенсон Л.С. Термические основы формирования стекла. 1950. 380 с.
- [9] Мазурин О.В. Отжиг снаев стекла с металлом. Львов: Выща школа, 1980. 140 с.
- [10] Александров В. М., Ромалис Б. Л. Контактные задачи в машиностроении // Машиностроение. 1986.
- [11] Арутюнян Н. Х. О контактном взаимодействии упругого кольца с упругим цилиндром // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1994. № 2. С. 204–206.
- [12] Панасюк В. В., Теплый М. И. Некоторые контактные задачи теории упругости. Киев: Наук. Дум., 1975.
- [13] Ю. Н. Дроздов Д. В. Грилицкий В. П. Левицкий. Контакт пары вращающихся круговых цилиндров с учетом теплообразования от трения. № 6. 1991. С. 974–980.
- [14] Грилицкий Д. В., Краснюк П. П. Упругий контакт двух цилиндров. № 33(3). 1997. С. 31–38.
- [15] Краснюк П. П., Б. Чаповская Р. Термоупругий контакт бандажа и цилиндра в условиях фрикционного теплообразования // Физ.-хим. механика материалов. 2000. № 36(3). С. 42–52.
- [16] Любимова О. Н., Зайко Н.Ю. Температурные напряжения в соосных сопряженных цилиндрических системах и композиционных материалах с разной степенью проскальзывания по границе контакта // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2022. № 4(54). С. 5–13.



V. K. Goncharuk, N. Yu. Zaiko, A. A. Ratnikov, K. K. Shelkovnikov

## EXPERIMENTAL STUDIES OF ADHESIVE INTERACTION IN THE CONTACT ZONE OF GLASS AND ALUMINUM IN A GLASS-METAL COMPOSITE ELEMENT

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Abstract.** When creating glass-metal compounds, including a new structural material of glass-metal composite, the ability of glass to reliably connect with metals at a certain temperature level of glass and metal is used. The adhesion of hot glass is closely related to the physico-chemical processes occurring at the glass-metal interface. The connection depends on the temperature of the metal sheaths and the melt of the glass, the holding time, the pressure, the composition of the glass and metal. In this paper, the influence of technological parameters of centrifugal casting on the strength properties of a structural element of a glass-metal composite is experimentally investigated as a result of the contact interaction of layers, the adhesion strength of which determines the basic mechanical properties of the compound. An experimental method for determining the adhesive force in the study of structural cylindrical samples of glass-metal composite for shear is proposed.

**Keywords:** thermally stressed state, contact problem, coaxial cylindrical systems, layered composite materials.

### REFERENCES

- [1] Pikul V. Prospects for the creation of durable hulls of deep-sea equipment made of glass-metal composite // Shipbuilding. 2000. P. 14–16. (in Russian).
- [2] Pikul V. The method of manufacturing a glass metal composite // Patent No. 2304117 of the Russian Federation. 2007. 344 p. (in Russian).
- [3] Pikul V., Ratnikov A. Mathematical modeling of deformation of a cylindrical shell made of glass-metal composite in the process of its manufacture. No. 3. Moscow: Science, 2007. P. 10–15. (in Russian).
- [4] Lyubimova O. Glass-metal composite: mechanical properties, structural mechanisms of deformation at elevated temperatures, modeling of the processes of formation of structure and properties: dissertation ... Doctor of Physical and Mathematical Sciences : 02/01/04. 2020. (in Russian).
- [5] Lyubimova O. N., Morkovin A. Properties, macro- and microstructure of a layered structural element based on inorganic glass and steel - a glass-metal composite rod // Metallurgist. 2022. no. 9. P. 100–104. (in Russian).
- [6] Bocharova A. Mathematical modeling of the formation of a durable hull of deep-sea vehicles made of glass-metal composite. 2015. 18-23 p. (in Russian).
- [7] vv ll jj fyear. Cohesion and adhesion of hot glass. 1969. p. 170. (in Russian).
- [8] Eigenson L. Thermal foundations of glass formation. 1950. 380 p. (in Russian).
- [9] Mazurin O. Annealing of glass-metal junctions. 1980. (in Russian).

---

*Goncharuk Vladimir Kirillovich*, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Optical Materials, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

*Zaiko Nadezhda Yurevna*, senior lecturer of the Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia.

*Alexander Alexandrovich Ratnikov*, Head of the Laboratory of Computer Modeling of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia.

*Shelkovnikov Konstantin Konstantinovich*, Postgraduate student of the Department of Marine Engineering and Transport of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia.

- [10] Alexandrov V. M., Romalis B. L. Contact tasks in mechanical engineering // Mechanical engineering. 1986. (in Russian).
- [11] Harutyunyan N. H. On the contact interaction of an elastic ring with an elastic cylinder // Izv. RAS. Solid state mechanics. 1994. (in Russian).
- [12] Panasyuk V. V., Teply M. I. Some contact problems of elasticity theory. Kiev: Science. Doom., 1975. (in Russian).
- [13] Drozdov Y. N., Grilitsky D. V., Levitsky V. P. Contact of a pair of rotating circular cylinders taking into account heat generation from friction. Yerevan University Publishing House, 1991. P. 974–980. (in Russian).
- [14] Grilitsky D. V., Krasniuk P. P. Elastic contact of two cylinders. No. 33(3). 1997. P. 31–38. (in Russian).
- [15] Krasniuk P. P., B.Chapovskayaa R. Thermoelastic contact of the bandage and the cylinder under conditions of frictional heat generation // Phys.-chemical. mechanics of materials. 2000. no. 24(1). P. 42–52. (in Russian).
- [16] Lyubimova O. N., Zaiko N. Temperature stresses in coaxial coupled cylindrical systems and composite materials with varying degrees of slippage along the contact boundary // Bulletin of the I.Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of the limit state. 2022. no. 4(54). P. 5–13. (in Russian).