

Н. Ю. Зайко, О. Н. Любимова

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СООСНЫХ СОПРЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО ГРАНИЦЕ КОНТАКТА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Аннотация. Температурные напряжения в сопряженных системах, выполненных из разных материалов и в слоистых конструкционных материалах, даже при условии равномерного распределения температуры являются в первую очередь следствием разных механических свойств материалов, из которых выполнены сопряженные элементы или слои. 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. Предложено условие и метод совместного деформирования соосных цилиндров при разных условиях сопряжения по боковым поверхностям при неоднородных термомеханических характеристиках с учетом стесненного перемещения вдоль образующей для разных качественных условий взаимодействия на границе сопряжения. Метод позволяет существенно упростить задачу при условии термоупругого деформирования слое, а в случае вязкоупругого поведения с простыми ядрами релаксации позволяет получить аналитическое решение. Практическая значимость метода заключается в возможности моделирования технологических и остаточных напряжений в слоистых конструкционных цилиндрических системах, работающих в условиях циклического нагрева - охлаждения до высоких температур.

Ключевые слова: термонапряженное состояние, контактная задача, соосные цилиндрические системы, слоистые композиционные материалы.

DOI: 10.37972/chgpu.2022.54.4.001

УДК: 531.534

Введение Производственные и исследовательские системы в отраслях промышленности связанных с синтезом композиционных материалов являются особенно

© Зайко Н. Ю., Любимова О. Н., 2022

Зайко Надежда Юрьевна

e-mail: golobokovanyu@dvfu.ru, старший преподаватель, Политехнический институт Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, Россия..

Любимова Ольга Николаевна

e-mail: berms@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор, Политехнический институт Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, Россия.

Поступила 01.12.2022

сложными. Математическое моделирование множества технологий получения композитов, среди которых, осаждение матрицы плазменным напылением на упрочнитель и сдавливанием их в последствии; холодное ужатие составляющих частиц с дальнейшим спеканием; диффузионная сварка пакетной технологией монослойных лент компонентов; объединенная прокатка укрепляющих элементов с матрицей, направлено на поиск и оптимизацию технологических параметров процесса. Многопараметричность, и актуальность теоретических и экспериментальных исследований многих не до конца изученных физико-химических и механических процессов в технологии получения композиционных материалов оставляет актуальным поиск моделей позволяющих адекватно оценивать основные технологические параметры, которые оказывают доминирующее влияние на конечные эксплуатационные и физико-механические свойства материала. В слоистых композитах, полученных методами температурной обработки, соседние слои выполняются из разных материалов, или же из одного. Прочность связи по границе стыковки слоев устанавливается за счет диффузии через границу раздела в процессе термической обработки либо за счет механического сцепления при термомодеформировании в зоне пластичности [1, 2]. Если технологические параметры подобраны не точно, то зона контакта может содержать промежуточные хрупкие слои по границе их раздела или дефекты в виде неплотного прилегания материалов, что влияет на напряженно-деформируемое состояние при следующих циклах охлаждения. Дискретность контакта вызывает значительные изменения величин контактных напряжений как в крайних поверхностных слоях сопрягаемых слоев так и в объеме композиционных материалов и деталей. Контактное взаимодействие двух поверхностей с дискретным типом контакта рассмотрено, например, в работах [3–5]. Одним из современных направлений развития механики дискретного контакта является использование методов теории вероятностей [6], при котором неизвестные характеристики: фактическая площадь касания, нагрузка в зависимости от сближения, наибольшее контактное давление на единичной неровности рассматриваются как реализация случайного поля. Рассмотрение задач о внутреннем сжатии круговых цилиндров близких радиусов впервые было начато И.Я. Штаерманом [7], внешняя нагрузка, действующая на внутренний и внешний цилиндры по их поверхностям, осуществляется в виде нормального давления, диаметрально противоположного давлению контакта [7–9]. В работе [8] установлено, что полученная теоретическая оценка имеет существенную разницу с экспериментальными данными, теоретическое перемещение превышает экспериментальное в 3 раза. В какой-то мере эту разницу возможно с помощью ввода коэффициента перехода от трехмерной задачи к плоской [9]. В механике многослойных систем можно выделить два основных подхода к моделированию контактных задач [10–14]. Первый подход заключается в том, что контактное взаимодействие между слоями рассматривается как взаимодействие слоистых структур при соблюдении условий непрерывности векторов смещений при переходе через межфазную границу (идеальный контакт) [12, 13], однако, это условие не позволяет оценить разные соединения с неоднородной межфазной границей, которая может сама являться причиной снижения адгезионного сцепления между слоями, в следствии неоднородности своей структуры и расслоений внутри себя по границам различных фаз, что хорошо заметно, например, на фотографиях Рисунка 1 при микроскопических исследованиях зоны соединения стекла и стали в исследованиях [15–17]. К этим задачам относятся задачи для упругих покрытий на твердом теле рассмотренные в работах [11, 12], часто покрытия моделируются с использованием гипотез Кирхгофа-Лява теории оболочек,

которые в случае температурного расширения и существенной разницы не только в коэффициентах линейного температурного изменения, но и в модулях упругости между покрытием и подложкой могут приводить к существенным отклонением от экспериментально наблюдаемых явлений, например, покрытие на практике может отслаиваться, в то время как расчеты показывают обратное [12]. Моделирование покрытий с дефектами, неполным контактом или неоднородными свойствами в зоне соединения а также, наличие зон с ослабленным межфазным контактом на поверхностях раздела смежных слоев приводит к значительному повышению уровня сложности задачи [5]. Поэтому актуальным остается поиск методов и моделей для качественного анализа контактной задачи с учетом сред со сложной реологией. Для описания качества распределения случайного поля, также приходится опираться на аналитические решения полученные для тел простой геометрии, качественные приближения и результаты феноменологических линейных теорий. Необходимо уточнить, что, несмотря на наличие определенного экспериментального материала проверка адекватности предлагаемых математических моделей достаточно трудная и как правило используется лишь для качественной оценки. Поэтому развитие линейных моделей, позволяющих решать контактные задачи как следствие поведения под нагрузкой всей совокупности контактов, оправдано и остается актуальной задачей механики контактных взаимодействий.

Целью работы является разработка метода, позволяющего качественно оценить сцепление на границе сопряжения разных слоев в соосных цилиндрических слоистых композитах с разной реологией, деформирующихся в условиях повышенных температур [18]. В работе решена задача термомодеформирования соосного цилиндрического двухслойного композиционного элемента в упругом приближении при условии зависимости механических свойств от температуры. Практическая значимость работы связана с моделированием параметров технологического процесса получения стеклометаллического слоистого композита цилиндрической формы (стеклометаллокомпозита) и конструктивного элемента на его основе -стеклометаллокомпозитного стержня (Рис.1) [19–21].

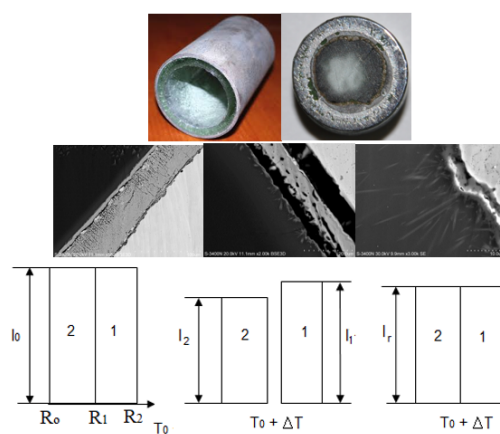


Рис. 1. Фотографии экспериментальных образцов стеклометаллокомпозита и некоторых особенностей в межфазном слое (оксидный слой, отслоение по межфазному слою, кристаллические фазы в межфазном слое).Схема изменения вдоль образующей плоского сая

Модель и метод определения термоупругих напряжений при разных условиях сцепления на границе сопряжения слоев.

В цилиндрической системе координат при условии осесимметричного изменения температуры в сопряжённой цилиндрической системе типа вал-цилиндр (стержень - цилиндрическая оболочка, цилиндр-цилиндр), где торцы цилиндров не закреплены, особенность на границе сопряжения будет заключаться в возможности разной деформации вдоль оси образующей (Рис. 1). Если температурное поле равномерно по всему объему, напряженно-деформируемое состояние будет следствием разницы механических свойств материалов и их зависимости от температуры.

При условии плоского обобщенного состояния и свободного проскальзывания в направлении образующей предположим, что

$$\Delta\epsilon_z(t) = \epsilon_z^{(1)} - \epsilon_z^{(2)} \neq 0 \quad (1)$$

и достигает своего максимального значения, здесь $\epsilon_z^{(1)}(t)(R_1 \leq r \leq R_2)$ и $\epsilon_z^{(2)}(t)(R_0 \leq r \leq R_1)$, $\Delta T(t) = T(t) - T_0$ - температура, при условии идеального контакта (1) примет вид:

$$\Delta\epsilon_z(t) = 0 \text{ или } \epsilon_z^{(1)} = \epsilon_z^{(2)} \quad (2)$$

Тогда условие дискретного контакта, можно рассматривать, как условие частичного проскальзывания введя в (1) феноменологический коэффициент ξ , так что

$$\epsilon_z^{(1)} - \epsilon_z^{(2)} = \xi \Delta\epsilon_z(t) \text{ при } 0 \leq \xi \leq 1 \quad (3)$$

здесь ξ характеризует часть от $\Delta\epsilon_z(t)$ полученную при свободном проскальзывании ($\xi = 1$). Термоупругая осесимметричная задача для систем сопряженных цилиндров с условием (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} u_r &= u(r, t), u_\phi = 0, u_z = w(z, t), \\ \epsilon_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r}, \epsilon_{\phi\phi} = \frac{u}{r}, \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} = \epsilon_z(t), \epsilon_{r\phi} = \epsilon_{rz} = \epsilon_{\phi z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} &= 0, \\ s_r &= 2Ge_r, s_\phi = 2Ge_\phi, s_z = 2Ge_z, \\ \sigma(r, t) &= 3K\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma_{rr} = \sigma_r(r, t)$, $\sigma_{\phi\phi} = \sigma_\phi(r, t)$, $\sigma_{zz} = \sigma_z(r, t)$, $\sigma = (\sigma_r + \sigma_\phi + \sigma_z)/3$, $\epsilon = (\epsilon_r + \epsilon_\phi + \epsilon_z)/3$, $\theta = 3\epsilon - \int_{T_0}^T \alpha(T)dT$, $s_r = \sigma_r - \sigma$, $s_\phi = \sigma_\phi - \sigma$, $s_z = \sigma_z - \sigma$, $e_r = \epsilon_r - \epsilon$, $e_\phi = \epsilon_\phi - \epsilon$, $e_z = \epsilon_z - \epsilon$, G - модуль сдвига, K - модуль объемной деформации. Краевые условия определяют из условий отсутствия нагрузки на внешних поверхностях и свободных от нагрузки торцов:

$$\begin{aligned} \sigma_r(R_0, t) &= 0, \sigma_r(R_2, t) = 0, \\ \int_{R_0}^{R_1} \sigma_z(r, t)rdr + \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z(r, t)rdr &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

а условия на границах контакта (3) дополняются условиями

$$u(R_1-, t) = u(R_1+, t), \sigma_r(R_1-, t) = \sigma_r(R_1+, t). \quad (6)$$

Задача (3)-(6) имеет на каждом временном слое аналитическое решение, определяемое двумя аналитическими итерациями:

1. Определяется $\Delta\epsilon_z$ по формуле (1) при этом в задаче (4)-(6), последнее уравнение в условиях (5) заменяется на $\int_{R_0}^{R_1} r\sigma_z(r,t)dr = 0$ и $\int_{R_1}^{R_2} r\sigma_z(r,t)dr = 0$.

2. Далее на каждом временном слое для определенного коэффициента ξ и для найденного значения $\Delta\epsilon_z$ решается задача (3)-(6).

При термоупругом деформировании обоих слоев несложно получить аналитическое решение, заметим также, что в случае термоупругого деформирования возможно и нет особенной нужды в конструкции упрощающих предположений позволяющих понизить размерность задачи, возможно здесь нужно пользоваться уже развитыми подходами в механике контактных взаимодействий, и учитывать силы трения, например, в рамках закона Амонтона-Кулона, когда модуль касательного напряжения в точках контактной поверхности меньше либо равен произведению коэффициента трения (трения скольжения) на модуль нормального напряжения и в дальнейшем решать задачу численно. Однако для случая сложного реологического поведения материалов, как в рассматриваемом случае совместного деформирования вязкоупругих стеклюющихся материалов с упругопластическими, предлагаемый подход к возможному учету сцепления (прилипания) представляется разумным. При усложнении реологии слоев методы численно - аналитических расчетов предложенные, например, в работах [18,22-24] метод учета сцепления разных слоев не вносит усложняющих конструкций, кроме дополнительного определения на каждом временном шаге $\Delta\epsilon_z$.

На графиках Рис. 2-3 приведены отдельные результаты расчета напряжений для цилиндрических систем (Рис. 2-3)- стержень (вал)-цилиндр ($R_0 = 0$) и (Рис. 4)- двухслойный цилиндр; для различных значений ξ , физико-механические параметры были выбраны соответствующими материалам: для слоя (1)- сталь; (2)- кварцевое стекло, $k = \frac{2R_1}{R_2 - R_1}$.

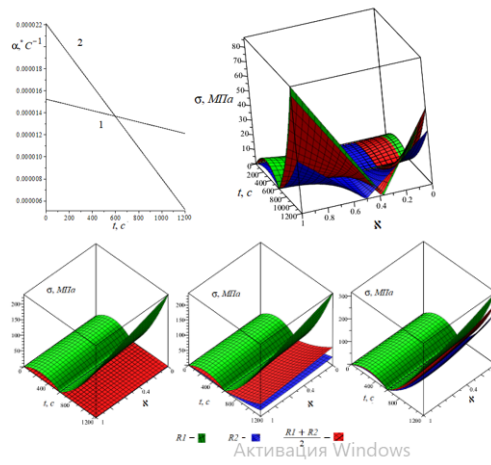


Рис. 2. Изменение во временно-температурном режиме коэффициентов линейного расширения для разных слое (слева) и интенсивность напряжений (справа) для (2) слоя (сверху), для (1) слоя (снизу) при $k = 0, 1; 1; 10$ (слева - направо).

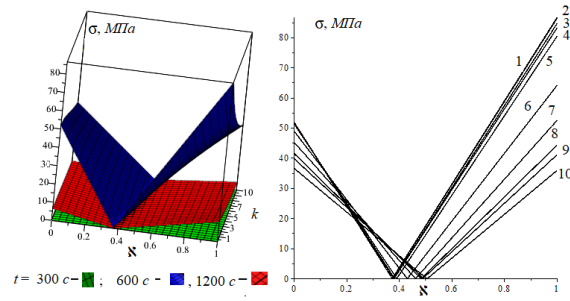


Рис. 3. Изменение интенсивности напряжений во (2) слое в фиксированные моменты времени (слева) и для конечного момента времени (интенсивность, характеризующая остаточные напряжения) для разных значений k : 1-0,1; 2-0,2; 3-0,5; 4-0,7; 5-0,8; 6-1; 7-3; 8-7; 9-8; 10-10

Из графиков Рис.2-3 заметны особенности напряженного состояния в точке пересечения коэффициента линейного температурного расширения для двух слоев и интервала значений $0,35 < \xi < 0,55$ для (2) слоя. Интенсивность напряжений во (2) слое максимальная при $\xi = 1$, что связано прежде всего с незначительными значениями σ_z значительной разницей между ним и $\sigma_r = \sigma_{fi}$.

При построении аналогичных графиков для двухслойного цилиндра (Рис. 4) замечено изменение графика интенсивности во (2)-м слое в сторону полного сглаживания интенсивности напряжений в интервале значений $0,35 < \xi < 0,55$.

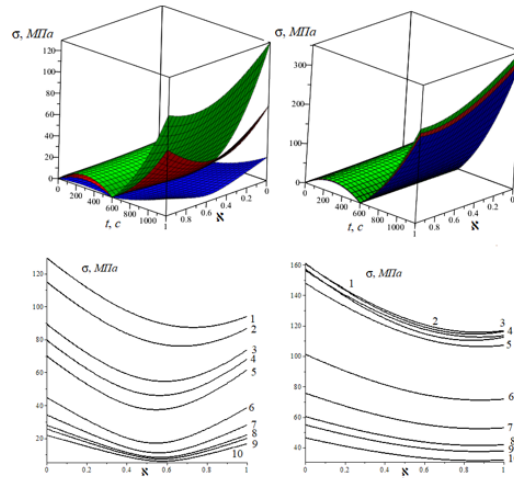


Рис. 4. Изменение во временно-температурном режиме интенсивности напряжений(сверху):для (1) слоя (справа); для (2) слоя (слева) при $k = 0,1$ -зеленый, 1 -красный, 10 -синий.Изменение интенсивности напряжений во (2) слое для конечного момента времени (интенсивность, характеризующая остаточные напряжения) в разных точках (снизу) по радиусу при R_0 (слева) и R_1 (справа) для разных значений k : 1-0,1; 2-0,2; 3-0,5; 4-0,7; 5-0,8; 6-1; 7-3; 8-7; 9-8; 10-10.

Заключение Предложен метод совместного деформирования соосных цилиндров при разных условиях сопряжения по боковым поверхностям: от свободного проскальзывания вдоль оси до идеального контакта, с учетом частичного (ограниченного) проскальзывания. Практическая значимость метода заключается в возможности моделирования технологических и остаточных напряжений не только в стеклометаллокомпозите, но и в слоистых конструкционных цилиндрических системах, работающих в условиях циклического нагрева - охлаждения до высоких температур. Предлагаемый подход обоснован для случая сложного реологического поведения материалов, например, для случая совместного деформирования вязкоупругих стеклующихся материалов с упругопластическим.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю. П. Трыков Л. М. Гуревич Д. В. Проничев. Композиционные переходники // ВолгГТУ, РПК «Политехник»-Волгоград. 2007. 328 с.
- [2] Ю. П. Трыков Л. М. Гуревич В. Г. Шморгун. Титаностальные композиты и соединения // Монография. ВолгГТУ.-Волгоград. 2013. 344 с.
- [3] Л. А. Агловян Р. С. Геворкян. О действии дискретной нагрузки на слоистые пластины, состоящие из чередующихся упругих и реологических слоев. Москва: Наука, 1996. С. 71–81.
- [4] И. Г. Горячева И. В. Фельдштейн. Анализ влияния внутренней системы дефектов на напряженное состояние упругих тел // Изв. РАН МТТ. 1996. № 5. С. 55–61.
- [5] И. Г. Горячева Е. В. Торская. Напряженное состояние двуслойного упругого основания при неполном сцеплении слоев // Трение и износ. 1998. № 19(3). С. 289–296.
- [6] А. И. Свириденко С. А. Чижик М. И. Петроковец. Механика дискретного фрикционного контакта. 1990. 289-296 с.
- [7] Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. 1949. 270 с.
- [8] Милов А. Б. О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений. 1973. С. 70–72.
- [9] Теплый М. И. Контактные задачи для тел с круговыми границами. Львов: Выща школа, 1980. 176 с.
- [10] И. Г. Горячева А. П. Горячев Ф. Садеги. Контактное взаимодействие упругих тел с тонкими вязкоупругими покрытиями в условиях трения качения или скольжения // Прикл. матем. и мех. № 59(4).
- [11] В. В. Можаровский В. Е. Старжинский. Прикладная механика слоистых тел из композитов: Плоские контактные задачи // Наука и техника. 1988.
- [12] Б. Л. Пелех А. В. Максимук И. М. Коровайчук. Контактные задачи для слоистых элементов конструкций. Киев: Наук. Дум., 1988.
- [13] Саркисян В. С. Контактные задачи для полуплоскостей и полос с упругими накладками. Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1983. 260 с.
- [14] Xiao Yi Wang Wen-Xue Takao Yoshihiro. . Two dimensional contact stress analysis of composite laminates with pinned - joint. № 81.
- [15] Любимова О. Н. Моделирование параметров температурного режима при изготовлении стеклометаллокомпозита // Теплофизика и аэромеханика. 2017. № 24(1). С. 127–135.
- [16] Любимова О. Н. Особенности структуры зоны соединения стекла и стали в технологии получения стеклометаллокомпозита // Материаловедение. 2017. № 4. С. 3–7.
- [17] Любимова О. Н. Моделирование поведения несогласованного спая стекла с металлом с учетом свойств зоны соединения // Физическая мезомеханика. 2016. № 19(2). С. 114–120.
- [18] Галин Л. А. Развитие теории контактных задач // Наука. 1976. 494 с.
- [19] Pikul V. V. A Cylindrical Shell Made of Glass-Metal Composite // Applied Mechanics and Materials. 2015. № 24(1). С. 230–235.
- [20] Пикуть В. В. Перспективы создания слоистого композита на основе стекломатериалов // Перспективные материалы. 1999. № 1. С. 34–42.
- [21] Lyubimova O. N. Characterisation of the mechanical and corrosive properties of newly developed glass-steel composites // Materials in Technologies. 2016. № 50(1). С. 95–100.
- [22] Галанин М. П. Математическое моделирование термоупругопластического контактного взаимодействия системы тел // Mathematica Montisnigri. 2014. № 30. С. 99–114.

- [23] Burenin A. A. Stress relaxation in cylindrical glass-to-metal junctions with account for the quality of a junction region // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018. № 59(6). С. 1095–1103.
- [24] Любимова О. Н. Метод расчета эволюции напряжений в стеклометаллокомпозите с учетом структурных и механических релаксационных процессов // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019. № 12(2). С. 215–229.

N. Yu. Zaiko, O. N. Lubimova

TEMPERATURE STRESSES IN COAXIAL COUPLED CYLINDRICAL SYSTEMS AND COMPOSITE MATERIALS WITH VARYING DEGREES OF SLIPPAGE ALONG THE CONTACT BOUNDARY

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. Temperature stresses in conjugate systems made of different materials and in layered structural materials, even under the condition of uniform temperature distribution, are primarily a consequence of the different mechanical properties of the materials from which the conjugate elements or layers are made. At the same time, the coupling properties of dissimilar materials and the type of joint obtained have a significant impact on the overall picture of temperature stresses: gluing, welding, or hot fit; ideal contact, free or partial slippage in different directions. The condition and method of joint deformation of coaxial cylinders under different conditions of coupling along the lateral surfaces with inhomogeneous thermomechanical characteristics, taking into account the constrained movement along the generatrix for different qualitative conditions of interaction at the interface, are proposed. The method makes it possible to significantly simplify the problem under the condition of thermoelastic deformation of the layer, and in the case of viscoelastic behavior with simple relaxation nuclei, it allows to obtain an analytical solution. The practical significance of the method lies in the possibility of modeling technological and residual stresses in layered structural cylindrical systems operating under conditions of cyclic heating and cooling to high temperatures.

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

REFERENCES

- [1] Yu. P. Trykov L. M. Gurevich D. V. P. Composite adapters. 2007. 328 p. (in Russian).
- [2] Yu. P. Trykov L. M. Gurevich V. S. Titanostal composites and compounds. 2013. 344 p. (in Russian).
- [3] L. A. Aglovyan R. S. G. On the effect of a discrete load on layered plates consisting of alternating elastic and rheological layers. Moscow: Science, 1996. P. 71–81. (in Russian).
- [4] And .G. Goryacheva I. V. F. Analysis of the effect of the internal system of defects on the stress state of elastic bodies. 1996. P. 55–61. (in Russian).
- [5] I. G. Goryacheva E. V. T. Stress state of a two-layer elastic base with incomplete adhesion of layers. 1998. P. 289–296. (in Russian).
- [6] A. I. Sviridenok S. A. Chizhik M. I. P. Mechanics of discrete friction contact. 1990. 289-296 p. (in Russian).
- [7] Shtaerman I. Ya. Contact problem of elasticity theory. 1949.
- [8] Milov A. B. On calculating the contact stiffness of cylindrical joints. 1973. P. 70–72. (in Russian).

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

Lubimova Olga Nikolaevna, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor of the Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia.

-
- [9] Teply M. I. Contact problems for bodies with circular boundaries. Lviv: Vyshcha school, 1980. (in Russian).
- [10] I. G. Goryacheva A. P. Goryachev F. S. Contact of elastic bodies with thin viscoelastic coatings under conditions of rolling or sliding friction. (in Russian).
- [11] V. V. Mozharovsky V. E. S. Applied mechanics of layered bodies from composites: Plane contact problems. 1988. (in Russian).
- [12] B. L. Pelekh A. V. Maksimuk I. M. K. Contact problems for layered structural elements. Kiev: Science. Doom., 1988. (in Russian).
- [13] Sargsyan V. S. Contact problems for half-planes and strips with elastic overlays. Yerevan: Yerevan University Publishing House, 1983. 260 p. (in Russian).
- [14] Xiao Yi Wang Wen-Xue T. Y. . Two dimensional contact stress analysis of composite laminates with pinned - joint. No. 81. (in Russian).
- [15] Lyubimova O. N. Modeling of the parameters of the temperature regime in the manufacture of glass-metal composite. 2017. P. 127–135. (in Russian).
- [16] Lyubimova O. N. Features of the structure of the glass-steel junction zone in the technology of glass-metal composite production. 2017. P. 3–7. (in Russian).
- [17] Lyubimova O. N. Modeling the behavior of an inconsistent glass-metal junction, taking into account the properties of the junction zone. 2016. P. 114–120. (in Russian).
- [18] Lyubimova O. Glass-metal composite: mechanical properties, structural mechanisms of deformation at elevated temperatures, modeling of the processes of formation of structure and properties: dis. d. phys.-mat.Sciences : 01.02.04 / Lyubimova Olga Nikolaevna. 2020. P. 289–294. (in Russian).
- [19] Pikul V. V. A Cylindrical Shell Made of Glass-Metal Composite. 2015. P. 230–235. (in Russian).
- [20] Pikul V. V. Prospects for creating a layered composite based on glass materials. 1999. P. 34–42. (in Russian).
- [21] Lyubimova O. Characterisation of the mechanical and corrosive properties of newly developed glass-steel composites. 2016. P. 95–100. (in Russian).
- [22] Galin L. A. Development of the theory of contact problems. 1976. 494 p. (in Russian).
- [23] Galanin M. P. Mathematical modeling of thermoelastic plastic contact interaction of a system of bodies. 2014. P. 99–114. (in Russian).
- [24] Burenin A. A. Stress relaxation in cylindrical glass-to-metal junctions with account for the quality of a junction region. 2018. P. 1095–1103. (in Russian).
- [25] Lyubimova O. N. Method for calculating the evolution of stresses in a glass-metal composite taking into account structural and mechanical relaxation processes. 2019. P. 215–229. (in Russian).