

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9; 620.171.5; 621.927.08; 675.8
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100



ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОНИКАНИИ ЛЕЗВИЙ ИНСТРУМЕНТА В УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Сергеев С.В.¹, Гузеев В.И.¹, Пузанков М.С.¹, Шадрин П.А.¹, Козлов А.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для удешевления изделий из металлоподобных, вариативных минеральных и конвергентных композитов дисперсные компоненты на производстве стремятся получать селективно при переработке отходов упруговязкопластичных материалов. В частности, в соответствии с требованиями к изделиям такие отходы измельчают во вторичную крошку, стружку или волокна резанием, обеспечивая требуемую геометрию, не нарушая структуру и физико-механические свойства вещества. Если для изучения структуры, например, волокнистых сред природного происхождения достаточно применить микроскоп, то их физико-механические свойства, как правило, определяют только эмпирическим путем, причем величины их параметров могут существенно колебаться в зависимости от природных особенностей их образования. Такие параметры являются основой не только для развития производственно-технической базы, но и для выполнения научных исследований. **Цель работы.** Для наглядности измерения напряжений и деформаций в упруговязкопластичных средах целесообразнее всего проводить поляризационно-оптическим методом с использованием эквивалентных оптически чувствительных материалов. **Используемые методы.** Статья посвящена подбору рецептов образцов из эквивалентных материалов с учетом коэффициентов подобия для модельной оценки напряженно-деформированного состояния различных видов кож при проникании в них имитатора двухлезвийного инструмента – диспергатора. **Результат.** В работе описана методика проведения модельного эксперимента, оценены прочностные и силовые характеристики процесса проникания, а также приведены визуальные изображения возникающих при этом напряжений в эквивалентных прозрачных оптически чувствительных материалах. Полученные результаты могут быть полезны исследователям, материаловедом при разработке природоподобных композитов, конструкторам-разработчикам новых способов и устройств для селективного измельчения отходов упруговязкопластичных материалов, а также переработчикам отходов.

Ключевые слова: моделирование, поляризационно-оптический метод, коэффициенты подобия, оценка напряжений и деформаций в материале, эквивалентные оптически чувствительные материалы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (региональный конкурс Челябинской области) № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

© Сергеев Ю.С., Платов С.И., Сергеев С.В., Гузеев В.И., Пузанков М.С., Шадрин П.А., Козлов А.В., 2024

Для цитирования

Применение поляризационно-оптического метода для оценки деформационных и силовых характеристик при проникании лезвий инструмента в упруговязкопластичные материалы / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Сергеев С.В., Гузеев В.И., Пузанков М.С., Шадрин П.А., Козлов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 88-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF A POLARIZATION OPTICAL METHOD FOR ASSESSING DEFORMATION AND FORCE CHARACTERISTICS WHEN CUTTING TOOL EDGES PENETRATE ELASTOVISCOPLASTIC MATERIALS

Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Sergeev S.V.¹, Guzeev V.I.¹, Puzankov M.S.¹, Shadrin P.A.¹, Kozlov A.V.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In order to reduce the cost of products made of metal-like, variotropic mineral and convergent composites, dispersive components are sought to be produced selectively when processing elastic-viscous-plastic material waste. In particular, in accordance with the requirements for the products, such wastes are crushed into secondary granules, chips or fibers by cutting, providing the required geometry without disturbing the structure and physical and mechanical properties of the substance. If to study the structure, for example, of fibrous media of a natural origin, it is enough to apply a microscope, their physical and mechanical properties, as a rule, are determined only empirically, and the values of their parameters can vary significantly depending on the natural features of their formation. Such parameters are the basis not only for the development of the production and technical base, but also for scientific research. **Objectives.** For clarity, it is more expedient to measure stresses and deformations in elastic-viscous-plastic media by applying the polarization optical method, using equivalent optically sensitive materials. **Methods Applied.** The article is devoted to the selection of sample formulations from equivalent materials, taking into account similarity coefficients for a model assessment of the stress and strain state of various types of leather at the penetration of a simulator of a double blade tool, namely a disperser. **Result.** The article describes the methodology of the model experiment, assesses strength and force characteristics of the penetration process, and provides visual images of the resulting stresses in equivalent transparent, optically sensitive materials. The obtained results can be useful for researchers and material scientists in the development of nature-like composites, for designers, developing new methods and devices for selective grinding of elastic-viscous-plastic material waste, as well as for waste recyclers.

Keywords: modeling, polarization optical method, similarity coefficients, assessment of stresses and deformations in the material, equivalent optically sensitive materials

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (the regional competition of the Chelyabinsk Region), No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20067/>.

For citation

Sergeev Yu.S., Platov S.I., Sergeev S.V., Guzeev V.I., Puzankov M.S., Shadrin P.A., Kozlov A.V. Application of a Polarization Optical Method for Assessing Deformation and Force Characteristics when Cutting Tool Edges Penetrate Elastoviscoplastic Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 88-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100>

Введение

На современном этапе развития перерабатывающей промышленности актуальным становится снижение себестоимости изделий из металлоподобных, вариатропных минеральных и природоподобных (конвергентных) композитов [1-4]. Более низкая себестоимость может быть обеспечена за счет добавления в исходное сырье вторичной стружки, крошки и волокон, полученных при переработке отходов упруговязкопластичных материалов [5-7]. Требуемую геометрию вторичных дисперсных компонентов без изменения структуры и физико-механических свойств обычно получают резанием или дроблением [8, 9]. Причем возможные структурные изменения, связанные с раз-

рушением среды, контролируют посредством микроскопа с большим увеличением, а ухудшение физико-механических показателей продукта обычно фиксируют эмпирически [9-11]. Контроль за соблюдением таких параметров, как внутренние напряжения и деформации в упруговязкопластичных материалах, нагляднее всего производить поляризационно-оптическим методом с использованием эквивалентных оптически чувствительных материалов [12, 13].

Исследования напряженно-деформированного состояния многокомпонентных материалов и изделий из них в настоящее время требует создания новых и более совершенных методов измерений напряжений и деформаций. Одним из таких методов является фотоупругое моделирование поляризационно-оптичес-

ким методом с использованием высокомодульных и низкоимодульных материалов. Преимуществом данного метода является возможность не только численно, но и наглядно определить концентрацию напряжений при деформации исследуемого образца.

В частности, в качестве исследуемой деформируемой среды могут быть обрезки кожи различного происхождения. Ввиду того, что кожевенный материал сам по себе имеет непрозрачную структуру, а значит исследования его напряженно-деформированного состояния не поддается экспериментальному изучению методами фотомеханики, то возникающие напряжения при действии на него режущих лезвий инструмента [8] можно оценить только методом эквивалентных материалов [14-17]. Поэтому, в данном случае допустив соблюдение условий подобия [12, 13], можно произвести замену кожи на другой материал, обладающий оптической светочувствительностью.

Поскольку в основе поляризационно-оптического метода лежит явление двойного лучепреломления, то будем использовать оптически чувствительный материал, который под воздействием напряжений приобретает оптическую анизотропию [12, 13]. То есть при воздействии нагрузки такие прозрачные материалы демонстрируют свойства, как у двулучепреломляющих оптически анизотропных кристаллов, но при снятии механического воздействия эти материалы, в отличие от кристаллов, снова становятся оптически изотропными. Иными словами, явление временного двойного лучепреломления лежит в основе поляризационно-оптического метода исследования напряжений. Поскольку натуральная кожа – это низкоимодульный материал, то в качестве эквивалентного ма-

териала выбрана эпоксидная смола. Некоторые физико-механические свойства эпоксидных и полиэфирных смол [18, 19] для сравнения приведены в табл. 1.

Основная часть

Для того чтобы приготовить эпоксидную смолу с прочностными параметрами, соразмерными физико-механическим параметрам натуральной кожи, нужно воспользоваться теорией подобия. То есть по полученным данным исследуемой модели возможно перейти к натурному материалу и путем пересчета выяснить эквивалентные величины. Для выполнения поставленной задачи – определения напряжений – в соответствии с [13] рассматривают подобие физических явлений. А именно физические явления будут подобны, если они протекают в геометрически подобных системах, причем поля всех одинаковых физических переменных, описывающих явления, соответственно, подобны, а физическое подобие в первую очередь обусловлено геометрическим подобием. Поэтому между двумя физическими явлениями существует линейное взаимно-однозначное соответствие:

$$X_n = k_x \cdot X_m, \tag{1}$$

где X_n – физическая величина для натурального материала («натура»); X_m – физическая величина опытной модели эквивалентного материала («модель»); k_x – коэффициент подобного преобразования.

Это отношение определяет связь между сходственными скалярными, векторными или тензорными величинами. Обычно для «натуры» и ее «модели» имеют место разные типы соответствия.

Таблица 1. Физико-механические свойства смол
Table 1. Physical and mechanical properties of resins

Свойства	Эпоксидные смолы (без пластификатора)	Полиэфирные смолы
Плотность ρ , г/см ³	1,19-1,28	1,1-1,25
Прочность на растяжение σ_p , МПа	30-90	42-70
Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа	60-130	50-100
Прочность на сжатие σ_c , МПа	≥ 130	85-140
Разрушающее напряжение при сдвиге τ , МПа	42-53	38-48
Температура полимеризации T_p , °C	≥ 20	≥ 23
Водопоглощение W , %	0,01-0,1	0,07-0,15
Теплостойкость $K_{теп}$, °C	55-170	80-200
Ударная вязкость K_C , кДж/м ²	5-25	3-12
Температура разложения T_p , °C	340-350	–
Коэффициент линейного расширения α , °C ⁻¹	$(4,5-6,5) \cdot 10^{-5}$	$(5-10) \cdot 10^{-5}$
Модуль упругости E , Па	$(0,28-0,42) \cdot 10^4$	$(0,21-0,46) \cdot 10^4$
Относительное удлинение при разрыве δ_2 , %	2-6	≥ 5
Коэффициент Пуассона ν	0,34	0,34
Усадка ϵ , %	0,5-1	7

В основе физического подобия лежит критерий подобия – безразмерная величина, составленная из размерных физических параметров. На основе проведенного анализа [13] критериев подобия – физико-механических и геометрических параметров – выявлено, что главным условием для выбора эквивалентного материала является равенство коэффициентов Пуассона «модели» и «натуры». На практике точное соблюдение этого условия невозможно, но можно говорить только о приближенном удовлетворении этого условия [13]. Натуральная кожа различных животных обладает достаточно высоким показателем коэффициента Пуассона – $\nu = 0,4-0,5$ и низким значением модуля упругости – $E = 20-100$ МПа. Причем вариативность этих значений зависит от возраста, условий содержания и качества кормления, а также от генетической предрасположенности доноров материалов.

В качестве эквивалентного материала выбрали эпоксидную смолу ЭД-20. Так как она имеет низкий коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$, то ее разбавили пластификатором, доведя практически до равенства коэффициентов ν «модели» и «натуры». В качестве пластификатора использовался дибутилфталат (ДБФ) [18]. Он улучшает упругие свойства и уменьшает хрупкие. Соотношение составов принималось в соответствии с рекомендациями [18, 20]:

– Модель №1, сопоставляемая с сыромятной кожей, представляет собой композицию 90 мас.ч. ЭД-20 + 10 мас.ч. ДБФ.

– Модель №2, сопоставляемая со свиной кожей

хромового дубления, представляет собой композицию 80 мас.ч. ЭД-20 + 20 мас.ч. ДБФ.

– Модель №3, сопоставляемая с кожей крупного рогатого скота (КРС) хромового дубления, представляет собой композицию 70 мас.ч. ЭД-20 + 30 мас.ч. ДБФ.

– Модель №4, сопоставляемая с оленьей кожей (замшей), представляет собой композицию 60 мас.ч. ЭД-20 + 40 мас.ч. ДБФ.

Поскольку натуральная кожа – это специфический свободно релаксирующий материал, то важно было выровнять еще один показатель – время релакса при одноосном сжатии образцов «натуры» и «модели». Таким образом получили эквивалентные материалы с очень близкими значениями коэффициентов Пуассона и их релаксационными свойствами для каждого вида кожи. В соответствии с табл. 2 в сравнении представлены физико-механические свойства для «модели» и кожи.

В качестве силового концентратора, играющего роль инструмента [8], использовались имитаторы из алюминия АЛ-2 ГОСТ 1583-93, форма и размеры которого представлены на рис. 1.

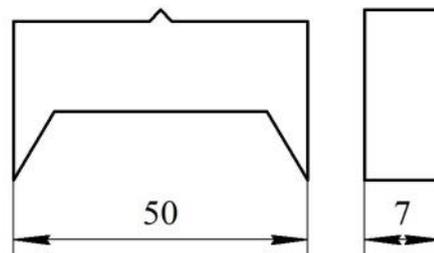
В соответствии с принятой рецептурой для экспериментов были изготовлены образцы в виде брусков «модели» толщиной 12 мм, шириной 10 мм и длиной 130 мм, а в качестве «натуры» использовались лоскуты натуральной кожи размерами примерно 60×60 мм и толщиной 2, 3, 4, 5 мм из сыромятной, свиной, оленьей кожи и кожи крупного рогатого скота.

Таблица 2. Сравнение физико-механических свойств
Table 2. Comparison of physical and mechanical properties

Физико-механические свойства	Сыромятная кожа	Модель №1	Свиная кожа	Модель №2	Кожа КРС	Модель №3	Оленья кожа (замша)	Модель №4
Модуль упругости E , МПа	32	620	66	1380	50	980	27	500
Прочность на растяжение σ_p , МПа	60	171,4	25	312,5	35	318,2	15	375
Коэффициент Пуассона ν	0,46	0,45	0,42	0,43	0,45	0,44	0,45	0,44



а



б

Рис. 1. Инструмент для размерного измельчения упруговязкопластичных материалов:

а – фото инструмента; б – пример имитатора режущей части инструмента

Fig. 1. A tool for dimensional grinding of elastic-viscous-plastic materials: a is a photo of the tool; b is an example of a tool cutting part simulator

Экспериментальная оценка показателей релаксационных свойств осуществлялась при одноосном сжатии образцов в соответствии с рис. 2 на универсальной разрывной машине модели Р-500. Ширина лунки измерялась посредством отсчетного микроскопа модели МПБ-2, а время релаксации – электронным секундомером. Затем сравнивали полученные графики зависимости времени релаксации от силы сжатия образцов «натуры» и «модели».

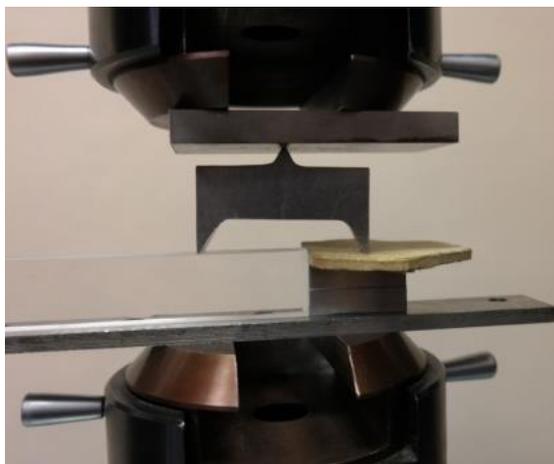


Рис. 2. Процесс проникания силового концентратора в кожу и «модель» из эквивалентного материала

Fig. 2. The process of penetration of the force concentrator into leather and the “model” from an equivalent material

Расхождение показателей релаксационных свойств материалов составило не более 3%.

Затем в ходе эксперимента, используя силовые концентраторы напряжений (имитаторы режущей части инструмента), нагружали образцы «натуры» и «модели» с увеличением одноосной нагрузки и измерением глубины их проникания в материалы в соответствии со схемой рис. 3, реализованной непосредственно на полярископе (рис. 4).

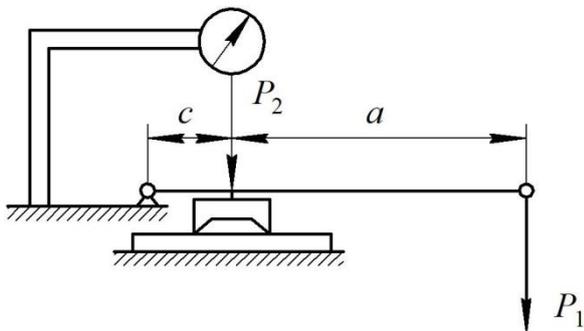


Рис. 3. Схема нагружения «модели»
Fig. 3. Loading diagram of the “model”

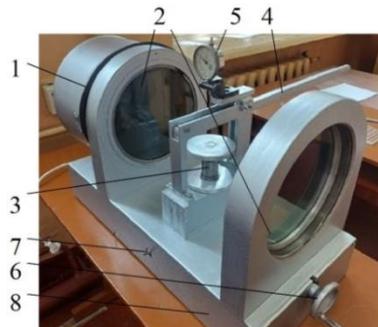


Рис. 4. Полярископ: 1 – источник света; 2 – поляроиды; 3 – винтовой домкрат; 4 – нагрузочное устройство рычажного типа; 5 – индикатор часового типа; 6 – устройство для относительного поворота поляроидов; 7 – электровыключатель; 8 – корпус

Fig. 4. Polariscopes: 1 is a light source; 2 is polaroids; 3 is a screw jack; 4 is a lever-type loading device; 5 is a clock-type indicator; 6 is a device for a relative rotation of polaroids; 7 is an electric switch; 8 is a case

Результаты замеров глубины внедрения силового концентратора в зависимости от прикладываемой силы представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения глубины внедрения силового концентратора

Table 3. Force concentrator penetration depths

Сила P , Н	Глубина внедрения q , мм			
	Сыромятная кожа	Свиная кожа	Кожа КРС	Оленья кожа
0,8	0,062	0,048	0,048	0,070
1,6	0,107	0,071	0,071	0,105
2,2	0,130	0,091	0,092	0,134
2,8	0,149	0,098	0,114	0,170
4,4	0,193	0,138	0,150	0,251

По полученным результатам замеров были построены графики зависимости глубины q внедрения лезвий от силы P одноосного нагружения. Пример изображен на рис. 5.

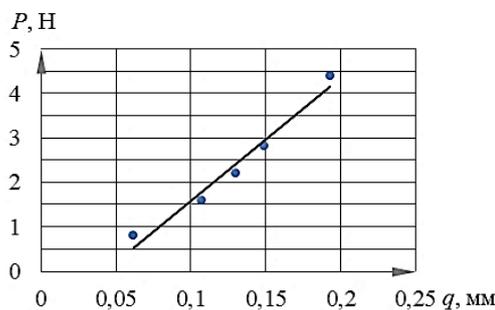


Рис. 5. График зависимости глубины q внедрения лезвий от силы P одноосного нагружения (пример)

Fig. 5. Graph of a dependence relation between blade penetration depth q and force P of uniaxial loading (for reference)

Для определения напряжений в материале воспользуемся изготовленными «моделями». Для начала необходимо определить, с какой силой нужно оказывать давление на «модель», то есть определить эквивалент силы. С этой целью воспользуемся формулами подобия [13] модуля упругости:

$$K_E = \frac{K_p}{K_l \cdot K_\delta}, \quad (2)$$

и силы нагружения

$$K_p = K_l \cdot K_\delta \cdot K_E,$$

где K_l – коэффициент подобия длин, $K_l = l_n/l_m$; K_δ – коэффициент подобия толщин, $K_\delta = \delta_n/\delta_m$; K_E – коэффициент подобия модуля упругости, $K_E = E_n/E_m$ (н – «натура»; м – «модель»).

Полученные значения представлены в табл. 4.

После этого нагружение «моделей» производили на специальной установке – полярископе (см. рис. 4), позволяющей производить замеры и одновременно наблюдать изменения спектров изохром в направлениях главных напряжений. При этом в соответствии с рис. 3 для всех видов кожи определяли соотношения сил:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{a+c}{c}, \quad (3)$$

где P_1 – масса груза на рычаге, Н; P_2 – эквивалентная сила, прикладываемая к инструменту, Н; a и c – длины плеч рычага, мм ($a = 518$ мм, $c = 72$ мм).

Затем эквивалентную силу рассчитывали через коэффициент подобия

$$P_2 = K_p \cdot P_1 \quad (4)$$

и заносили в табл. 5-8.

Таблица 4. Коэффициенты подобия

Table 4. Similarity coefficients

Вид кожи	Коэффициент подобия длин K_l	Коэффициент подобия толщин K_δ	Коэффициент подобия модуля упругости K_E	Коэффициент подобия силы K_p
Сыромятная кожа	0,46	0,16	0,052	$3,83 \cdot 10^{-3}$
Свиная кожа			0,048	$3,53 \cdot 10^{-3}$
Кожа КРС			0,051	$3,75 \cdot 10^{-3}$
Оленья кожи			0,054	$3,97 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5. Расчетная эквивалентная сила для сыромятной кожи

Table 5. Calculated equivalent force for rawhide leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
26	209
51	418
70	574
89	731
140	1149

Таблица 6. Расчетная эквивалентная сила для свиной кожи

Table 6. Calculated equivalent force for pigskin leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
28	227
55	453
76	623
97	793
152	1246

Таблица 7. Расчетная эквивалентная сила для кожи крупного рогатого скота

Table 7. Calculated equivalent force for cattlehide leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
31	213
61	427
84	587
107	747
168	1173

Таблица 8. Расчетная эквивалентная сила для оленьей кожи
Table 8. Calculated equivalent force for deerskin leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
26	202
52	403
152	554
193	705
303	1108

Далее делаем расчет напряжения смятия, МПа [13]:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{\sigma_0 \cdot n}{t}, \quad (5)$$

где P – сила, прикладываемая к имитатору (инструменту), Н; A – площадь смятия, вызываемая силовым концентратором напряжения, мм²,

$$A = s \cdot f, \quad (6)$$

где s – толщина лезвия силового концентратора, мм; f – длина контакта силового концентратора с нагружаемой «моделью», мм; σ_0 – оптическая постоянная материала, своя для каждого материала и для каждого цвета (показывает изменения разности напряжений в образце при изменении порядка полосы на единицу), Н/мм; t – толщина исследуемого бруска, мм; n – порядок изохромы.

Цвет точки на экране определяется разностью главных напряжений. Полосы, составленные точками одного цвета, называются изохромами. Причем при исследовании оптически активного материала в плоскополяризованном свете, который создается поляризатором, световой вектор в каждой точке нагруженной модели разлагается на две составляющие, направления которых совпадают с направлением главных напряжений. В соответствии с основным законом фотоупругости при разности главных напряжений точка на экране окрашивается определенным цветом ($n = 1$). При увеличении нагрузки в два раза увеличивается в два раза и разность главных напряжений, и точка вновь окрашивается тем же цветом ($n = 2$) и т.д. Таким образом, получается, что цвет точки прямо пропорционален разности напряжений. Происходит это следующим образом: в момент нагружения оптически активного материала зарождаются и проходят через точку новые и новые изохромы того же цвета. Чем «моложе» изохромы, тем они будут большего порядка.

Порядок изохром считается по интерференционной картине для любого выбранного цвета. При этом «модель» нагружают таким образом, чтобы на экране можно было одновременно наблюдать все цвета, тогда, увеличивая усилие в два, три и более раз, порядок будет возрастать для полосы каждого цвета. Согласно закону фотоупругости, наиболее удобным выбираем

тот цвет, который лучше воспринимается наблюдателем. В нашем случае выбираем красный цвет.

Из уравнения (5) получим равенство, из которого определим оптическую постоянную материала для красного цвета:

$$\sigma_0 = \frac{P \cdot t}{n \cdot A} = \frac{P \cdot t}{n \cdot s \cdot f}. \quad (7)$$

Через силовой концентратор с постепенным увеличением веса на рычаге и фиксацией полученных результатов передается усилие на «модели». Результаты изображений, наблюдаемые в полярископ при постепенном нагружении «модели», эквивалентной сыромятной коже, силовым концентратором, приведены в соответствии с рис. 6-10.

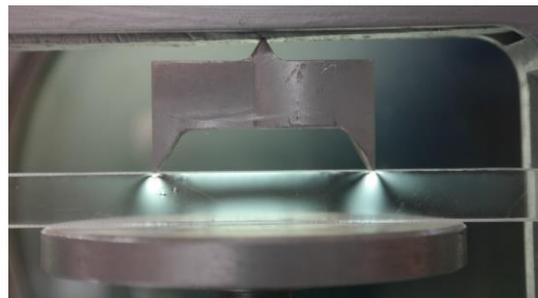


Рис. 6. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 209$ Н

Fig. 6. Observed image at load $P_2 = 209$ N

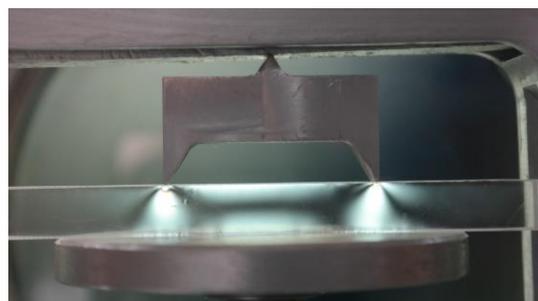


Рис. 7. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 418$ Н

Fig. 7. Observed image at load $P_2 = 418$ N

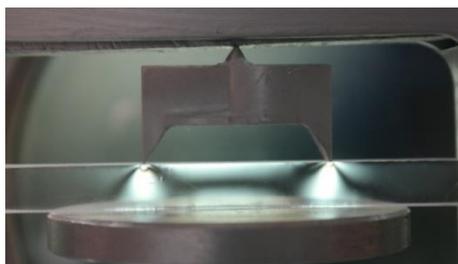


Рис. 8. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 574$ Н

Fig. 8. Observed image at load $P_2 = 574$ N

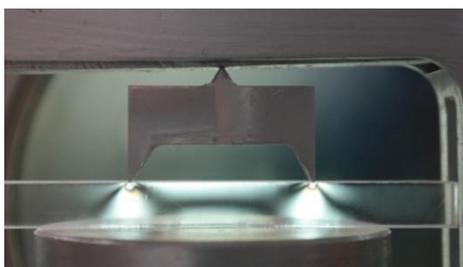


Рис. 9. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 731$ Н

Fig. 9. Observed image at load $P_2 = 731$ N

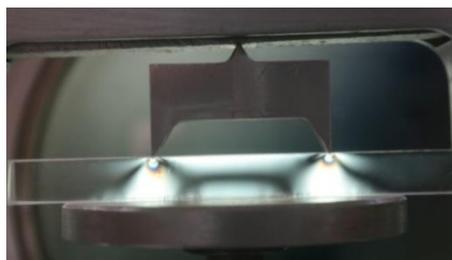


Рис. 10. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 1149$ Н

Fig. 10. Observed image at load $P_2 = 1149$ N

Определим отношение $P/n = \Delta P = \text{tg}\alpha$. Причем силу P необходимо принимать в два раза меньше P_2 , так как усилие распределяется между двумя зубьями, то есть $P = P_2/2$.

В табл. 9 показан пример зависимости порядка изохром от прикладываемой силы и глубины внедрения силового концентратора.

Таблица 9. Зависимость порядка изохром от прикладываемой силы, глубина внедрения силового концентратора (для сыромятной кожи)

Table 9. Dependence relation between the order of isochromes and applied force, force concentrator penetration depth (for rawhide leather)

P , Н	n , шт.	Глубина внедрения силового концентратора q , мм
104,5	0	0,045
209	1	0,070
287	1	0,085
365,5	2	0,100
574,5	3	0,130

Далее получим график зависимости порядка изохром от прикладываемой силы к инструменту (рис. 11).

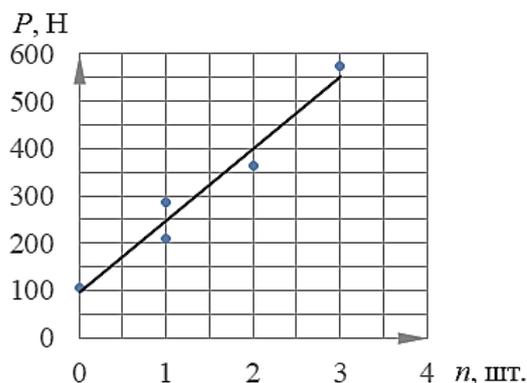


Рис. 11. Зависимость порядка изохром от прикладываемой силы

Fig. 11. Dependence relation between the order of isochromes and applied force

А вычислив тангенс угла наклона прямой

$$\text{tg}\alpha = (560 - 90)/3 = 156,7,$$

получим оптическую постоянную

$$\sigma_0 = \frac{\Delta P \cdot t}{s \cdot f} = \frac{156,7 \cdot 10}{1 \cdot 7,1} = 220,7 \text{ Н/мм.}$$

Затем получим максимальное напряжение в образце:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_0 \cdot n_{\max}}{t} = \frac{220,7 \cdot 3}{10} = 66 \text{ МПа.}$$

Аналогично проведены эксперименты с эквивалентными «моделями» для остальных видов кожи, при этом определяли напряжения и глубину внедрения силового концентратора.

Таким образом, в соответствии с табл. 10-13 представлены полученные значения напряжений.

Погрешность полученных значений глубины внедрения силового концентратора для «натуры» и «модели» не превышает 7%, что свидетельствует о правильности подбора и изготовления состава эквивалентного материала.

При этом, сравнивая графики на рис. 12 и 13, например, для оленьей кожи с ее эквивалентным материалом по уравнению прямой нетрудно заметить, что угол наклона прямой отличается, но несущественно, поскольку $\text{arctg}(4777,1) = 89,98^\circ \approx \text{arctg}(20,456) = 87,20^\circ$, а полученные отклонения объясняются невозможностью создания материала с точным соотношением коэффициентов Пуассона. Для остальных случаев графики не представлены, так как наблюдается то же самое.

Таким образом, используя эквивалентный материал и нагружая его определенной силой, удалось определить напряжения в кожевенных материалах.

Таблица 10. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для сыромятной кожи)

Table 10. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for rawhide leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Сыромятная кожа	209	66	0,065	0,8	3,4	0,062
	418		0,105	1,2		0,107
	574		0,125	2,2		0,130
	731		0,150	2,8		0,149
	1149		0,195	4,4		0,193

Таблица 11. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для свиной кожи)

Table 11. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for pigskin leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Свиная кожа	227	56	0,045	0,8	2,7	0,048
	453		0,070	1,2		0,071
	623		0,085	2,2		0,091
	793		0,100	2,8		0,098
	1246		0,130	4,4		0,138

Таблица 12. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для кожи КРС)

Table 12. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for cattlehide leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Кожа КРС	104,5	64,8	0,050	0,8	3,31	0,048
	209		0,075	1,2		0,071
	287		0,090	2,2		0,092
	365,5		0,110	2,8		0,114
	574,5		0,145	4,4		0,150

Таблица 13. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для оленьей кожи)

Table 13. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for deerskin leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Оленья кожа	202	66,3	0,075	0,8	3,6	0,070
	403		0,110	1,2		0,105
	551		0,130	2,2		0,134
	705		0,175	2,8		0,170
	1108		0,260	4,4		0,251

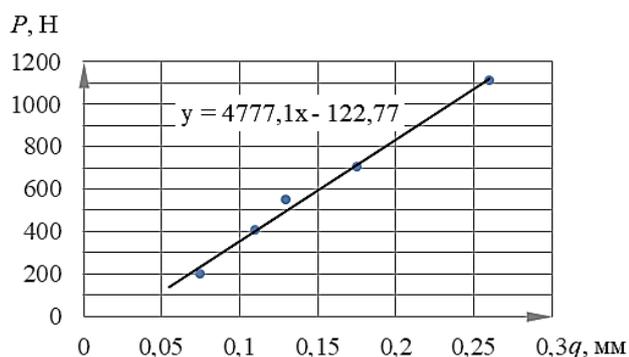


Рис. 12. График зависимости глубины врезания от прикладываемой эквивалентной силы к модели

Fig. 12. Graph of a dependence relation between penetration depth and applied equivalent force to the model

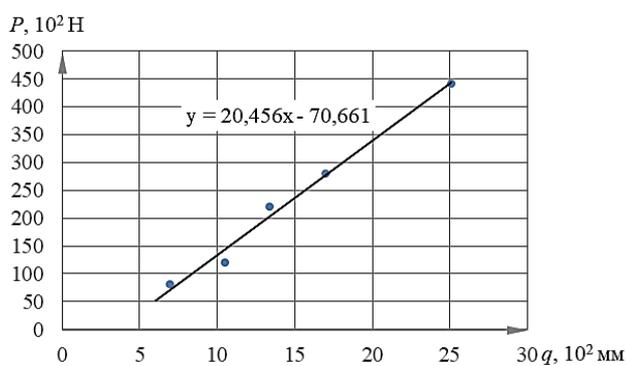


Рис. 13. График зависимости глубины врезания от прикладываемой силы к модели

Fig. 13. Graph of a dependence relation between penetration depth and applied force to the model

Заключение

Усовершенствованная методика экспериментальной оценки силовых характеристик процесса деформирования упруговязкопластичной среды двухлезвийным инструментом на основе поляризованно-оптического метода позволила с помощью экспериментальной «модели» вычислить эквивалентные напряжения в натуральной коже, которые могут быть использованы в дальнейшем при компьютерном моделировании процессов диспергирования кожевенных отходов [8].

Эксперименты с использованием различной геометрии силового концентратора и нагружаемой «модели» показали, как изменяется величина напряжения в образце. Основным параметр, влияющий на величину напряжений – площадь смятия, вызван самим силовым концентратором и расстоянием между его зубьями. Использование имитаторов с различной высотой показали, что этот геометрический параметр на величину напряжения не влияет.

Список источников

1. Ковальчук М.В. Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. 2011 Т. 6. №1-2. С. 13-23.
2. Овчинников А.А., Обручев Д.В., Данилов И.Н. Оптимизация составов композиционных материалов на основе технологии полиструктурной интеграции гетерогенных материалов // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. Вып. 1. С. 30-46. DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30
3. Левыкин С.В., Казачков Г.В., Яковлев И.Г. Конвергентные природоподобные технологии для устойчивого развития степных регионов России // Вопросы степеведения. 2018. №14. С. 72-75. DOI:10.24411/9999-006A-2018-00007
4. Баксанский О.Е., Скоробогатова А.В. Конвергенция и природоподобные технологии: методология современной науки и образования // Коллекция гуманитарных исследований. 2018. №5(14). С. 14-21.
5. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении: монография. М.: МАДИ, 2020. 304 с.
6. Проект указа Президента Российской Федерации «О стратегии развития природоподобных (конвергентных) технологий». URL: <http://regulation.gov.ru/p/128578> (дата обращения: 16.11.2023)
7. Anas S.M. & Shariq Mohd & Alam, Mehtab & Umair, Mohammad. Modeling of crashworthy foam mounted braced unreinforced brick masonry wall and prediction of anti-blast performance // International Journal of Protective Structures. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 241-283. DOI: 10.1177/20414196231164432
8. Пат. 2802786 Российская Федерация, МПК В02С 13/28, С14В 13/00. Способ измельчения коллагенсодержащих сред и инструмент для его осуществления / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев, А.А. Огурцова, М.С. Пузанков; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». № 2022130105; заявл. 21.11.2022; опубл. 01.09.2023.
9. Доможиров Д.В. К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 5-14. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14
10. Leshkov E.V., Sapozhnikov S.B. Modeling the Non-linear Deformation and Damage of Carbon-Aramid Fabric Composites in Tension // Mechanics of Composite Materials. 2020, no. 56, pp. 591-600. DOI: 10.1007/s11029-020-09906-1
11. Экспериментальное исследование влияния фелтинга на расслоение и остаточную прочность ПКМ при низкоскоростном ударе / Г.А. Форенталь, А.В. Безмельницын, А.В. Игнатова [и др.] // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения

- (МИКМУС – 2021): тр. конф. М.: ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН», 2021. С. 194-199.
12. Полоник М.В., Макарова Н.В., Манцыбора А.А. Численное моделирование абразивного износа цементных зернистых композитов с использованием экспериментальных данных // Вестник ИШ ДВФУ. 2019. №4 (41). С. 3-11. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-1
 13. Славин О.К., Трумбачев В.Ф., Тарабасов Н.Д. Методы фотомеханики в машиностроении. М.: Машиностроение, 1983. 269 с.
 14. Котенко М.В., Раздорский В.В., Лелявин А.Б. Поляризационно-оптический метод в исследовании напряженно-деформированного состояния моделей с дентальными имплантатами из нитинола // Байкальский медицинский журнал. 2016. Т. 147. №8. С. 34-38.
 15. Исследование механических характеристик и морфологии поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном / Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 32-44. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44
 16. Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Методические основы управления качеством продукции из волоконистых металлокомпозитов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 55-62. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62
 17. Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 56-63. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63
 18. Мостовой А.С. Разработка составов, технологии и определение свойств микро- и нанонаполненных эпоксидных композитов функционального назначения: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2014. 153 с.
 19. Справочник по материалам, применяемым в производстве обуви и кожгалантереи / Зурабян К.М., Краснов Б.Я., Пустыльник Б.Я., Бернштейн М.М. М.: Shoe-Ikons, 2004. 103 с.
 20. Исследование влияния пластификаторов и термопластов на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор) / Мустафа Л.М., Исмаилов М.Б., Ермаханова А.М., Санин А.Ф. // Комплексное использование минерального сырья. 2019. №4. С. 48-56. DOI: 10.31643/2019/6445.37
 2. Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Danilov I.N. Optimization of compositions of composite materials based on the technology of a polystructural integration of heterogeneous materials. *Umnye kompozity v stroitelstve* [Smart Composites in Construction]. 2022;3(1):30-46. (In Russ.) DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30
 3. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G. Convergent nature-like technologies for sustainable development of steppe regions of Russia. *Voprosy steppevedeniya* [Steppe Science]. 2018;(14):72-75. (In Russ.) DOI:10.24411/9999-006A-2018-00007
 4. Baksansky O.E., Skorobogatova A.V. Convergence and nature-like technologies: methodology of modern science and education. *Kollektsiya gumanitarnykh issledovaniy* [The Collection of Humanitarian Studies]. 2018;(5(14)):14-21. (In Russ.)
 5. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. *Prirodopodobnye materialy i konstruksii v mashinostroyenii: monografiya* [Nature-like materials and structures in mechanical engineering: monograph]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2020, 304 p. (In Russ.)
 6. Draft Decree of the President of the Russian Federation “On the Strategy for the Development of Nature-Like (Convergent) Technologies”. Available at: <http://regulation.gov.ru/p/128578> (Accessed on November 16, 2023).
 7. Anas S.M., Shariq Mohd, Alam Mehtab, Umair Mohammad. Modeling of crashworthy foam mounted braced unreinforced brick masonry wall and prediction of anti-blast performance. *International Journal of Protective Structures*. 2023;15(2):241-283. DOI: 10.1177/20414196231164432
 8. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Ogurtsova A.A., Puzankov M.S. *Sposob izmelcheniya kollagenosoderzhashchikh sred i instrument dlya ego osushchestvleniya* [A method for grinding collagen-containing media and a tool for its implementation]. Patent RU, no. 2802786, 2023.
 9. Domozhirev D.V. On the issue of increasing efficiency of mining and processing of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations to achieve quality requirements. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):5-14. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14
 10. Leshkov E.V., Sapozhnikov S.B. Modeling the non-linear deformation and damage of carbon-aramid fabric composites in tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2020;(56):591-600. DOI: 10.1007/s11029-020-09906-1
 11. Forental G.A., Bezmelnitsyn A.V., Ignatova A.V. et al. Experimental study on the influence of felting on delamination and residual strength of polymer composites under low speed impact. *XXXIII Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh*

References

1. Kovalchuk M.V. Convergence of sciences and technologies – a breakthrough into the future. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnologies]. 2011; 6(1-2):13-23. (In Russ.)

- uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS - 2021): Trudy konferentsii* [The 33rd International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Problems of Mechanical Engineering (MIKMUS – 2021): Proceedings of the conference]. Moscow: Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 194-199. (In Russ.)
12. Polonik M.V., Makarova N.V., Mantsybora A.A. Numerical modeling of abrasive wear of cement granular composites using experimental data. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta* [Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin]. 2019;(4(41)):3-11. (In Russ.) DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-1
 13. Slavin O.K., Trumbachev V.F., Tarbasov N.D. *Metody fotomekhaniki v mashinostroyeni* [Methods of photomechanics in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1983, 269 p. (In Russ.)
 14. Kotenko M.V., Razzorsky V.V., Lelyavin A.B. A polarization optical method in the study on the stress and strain state of models with dental implants made of nitinol. *Baykalskiy meditsinskiy zhurnal* [Baikal Medical Journal]. 2016;147(8):34-38. (In Russ.)
 15. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Study on mechanical characteristics and fracture surface morphology of the Ti surface-modified AK5M2 alloy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):32-44. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44
 16. Antipova T.N., Oleshko A.Yu. Basic procedures of product quality control for fiber metal composites. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):55-62. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62.
 17. Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Besonova Yu.A., Bagreeva K.V. Comparative analysis of physical and mechanical properties of biodegradable and synthetic polymers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):56-63. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63
 18. Mostovoy A.S. *Razrabotka sostavov, tekhnologii i opredelenie svoystv mikro- i nanonapolnennykh epoksidnykh kompozitov funktsionalnogo naznacheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of compositions, technologies and determination of micro- and nano-filled epoxy composites for functional purposes: PhD thesis]. Saratov, 2014, 153 p. (In Russ.)
 19. Zurabyan K.M., Krasnov B.Ya., Pustyl'nik B.Ya., Bernshtein M.M. *Spravochnik po materialam, primenyaemym v proizvodstve obuvi i kozhgalanterei* [Handbook of materials used in the production of footwear and leather goods]. Moscow: Shoe-Ikons, 2004, 103 p. (In Russ.)
 20. Mustafa L.M., Ismailov M.B., Ermakhanova A.M., Sanin A.F. Study on the influence of plasticizers and thermoplastics on mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber reinforced plastic (Review). *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya* [Integrated Use of Mineral Raw Materials]. 2019;(4):48-56. (In Russ.) DOI: 10.31643/2019/6445.37

Поступила 21.11.2023; принята к публикации 12.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 21/11/2023; revised 12/02/2024; published 27/06/2024

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Сергеев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Пузанков Максим Сергеевич – магистрант,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Шадрин Павел Александрович – студент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: i.pavel-shadrin@mail.ru.

Козлов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: kozlovav@susu.ru.

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of the Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of the Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Head of the Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Maksim S. Puzankov – master's student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Pavel A. Shadrin – student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: i.pavel-shadrin@mail.ru.

Aleksandr V. Kozlov – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: kozlovav@susu.ru.