

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ КОНСТАНТ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ЖУРКОВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИКОВЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ**

Научная статья

Ерофеев А.В.¹, Пашутин А.А.^{2,*}, Герасимов А.Е.³^{1,2,3} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aleksejpashutin674[at]gmail.com)

Аннотация

Для прогнозирования долговечности твердых тел необходимо определить термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова. В классическом случае физический смысл определяемых четырех констант следующий: период колебания кинетической единицы, начальная энергия активации процесса разрушения, температура существования твердого тела и структурно-механическая константа. В настоящее время существует несколько методик по их определению. В работе термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова определены для многослойных пластиковых сэндвич-панелей при поперечном изгибе двумя способами. По результатам исследования делается вывод о сходимости результатов определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова, полученных различными способами.

Ключевые слова: долговечность, многослойные пластиковые сэндвич-панели, обобщенное уравнение Журкова, термофлуктуационные константы.

DETERMINATION OF THERMOFLUCTUATION CONSTANTS OF THE GENERALISED ZURKOV EQUATION OF MULTILAYER PLASTIC SANDWICH PANELS BY DIFFERENT METHODS

Research article

Yerofeev A.V.¹, Pashutin A.A.^{2,*}, Gerasimov A.Y.³^{1,2,3} Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

* Corresponding author (aleksejpashutin674[at]gmail.com)

Abstract

To predict the durability of solid bodies, it is necessary to determine the thermofluctuation constants of the generalized Zhurkov equation. In the classical case, the physical meaning of the four constants to be determined is as follows: the period of oscillation of the kinetic unit, the initial activation energy of the destruction process, the existence temperature of the solid, and the structural-mechanical constant. Currently, there are several techniques for their determination. In this work, the thermofluctuation constants of the generalized Zhurkov equation are determined for multilayer plastic sandwich panels in transverse bending by two methods. According to the results of the study, it is concluded that the results of determining the thermofluctuation constants of the generalized Zhurkov equation obtained by different methods converge.

Keywords: durability, multilayer plastic sandwich panels, generalized Zhurkov equation, thermofluctuation constants.

Введение

В настоящее время прогнозирование долговечности твердых тел ведется в рамках термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твердых тел, в основе которой лежит представление о том, что решающая роль в процессе разрушения принадлежит тепловому движению кинетических единиц [1], [2], [3], [4], [5]. Основоположителем концепции является Журков Серафим Николаевич, который дал трактовку физического смысла констант, входящих в уравнение, впоследствии получившее его имя (уравнение Журкова) [6]. Развитие концепция получила в работах Регель В.Р., Томашевского Э.Е., Слуцкера А.И. и ряда других видных ученых Советского Союза [7]. Так, Ярцевым В.П. и Ратнером С.Б. уравнение Журкова было модифицировано путем добавления четвертой константы (температуры существования твердого тела) [8]. Поученное уравнение получило название обобщенного уравнения Журкова, имеющего следующий вид:

$$\tau = \tau_m \cdot \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R} \cdot (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (1)$$

Для определения долговечности материала для него необходимо установить четыре термофлуктуационные константы, которые определяются на основе экспериментальных данных зависимости долговечности от напряжения, действующего в материале, и температуры окружающей среды. В настоящей работе термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова определены для многослойных пластиковых сэндвич-панелей при поперечном изгибе двумя разными методами: классический метод [9] и метод эталонного пучка [10].

Методы и принципы исследования

Испытания проводились на образцах-балочках прямоугольного сечения размерами $b \times h = 20 \times 8,8$ мм. Длина образцов составляла 12 см. Для испытаний на поперечный изгиб использовался шестипозиционный стенд (рисунок 1), состоящий из рамы 1, выполненной из уголков, на опорной площадке которой установлены два стержня 3 диаметром 6 мм. Образец 2 помещался широкой стороной на опорные стержни и нагружался с помощью грузового устройства 4.

Расстояние между опорными стержнями составляло 10 см. Расчетная схема – однопролетная балка на двух опорах. Нагрузка прикладывалась сосредоточено по центру.

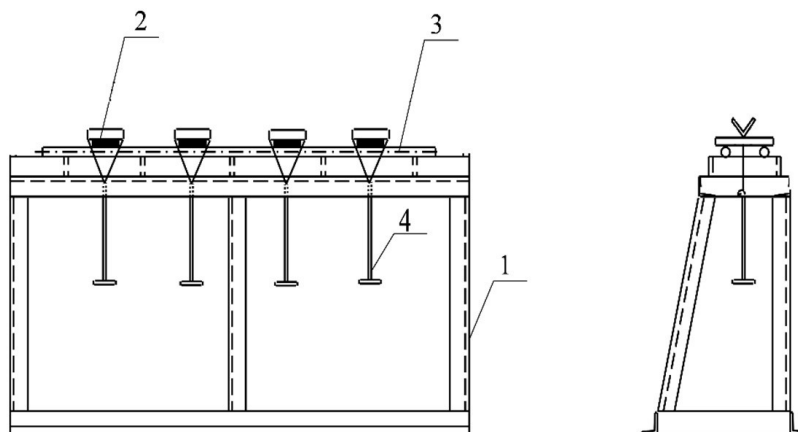


Рисунок 1 - Шестипозиционный стенд для испытаний на поперечный изгиб
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.1>

Примечание: 1 – корпус стенда; 2 – конусообразные держатели образцов; 3 – опоры для образцов (упоры); 4 – испытываемые образцы

Исследования проводились при трех различных температурах (30, 40 и 50 °С), при этом образцы при требуемой температуре выдерживались не менее 2 часов. Для каждой из трех выбранных температур определялась зависимость долговечности от неразрушающего напряжения (пять точек, т.е. пять значений неразрушающих напряжений). В ходе проведения эксперимента фиксировалось время от момента приложения нагрузки до наступления одного из предельных состояний. Для получения каждой точки в аналогичных условиях испытывалось не менее 8 образцов. Полученные экспериментальные данные проверялись на наличие грубых ошибок с помощью критерия Граббса. Для повышения достоверности полученных результатов использовалась статическая обработка, результатом, которой являлось определение среднего значения долговечности материала (логарифма долговечности) и границ доверительного интервала.

Основные результаты

Полученные экспериментальные данные зависимости долговечности (логарифм долговечности) от действующих в материале напряжений и температуры окружающей среды сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Экспериментальные данные зависимости долговечности от напряжения и температуры многослойных пластиковых сэндвич-панелей при поперечном изгибе

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.2>

	T = 30 °C				
	$\sigma=2,51$ МПа	$\sigma=2,46$ МПа	$\sigma=2,40$ МПа	$\sigma=2,30$ МПа	$\sigma=2,22$ МПа
lgτ	0,000	1,431	0,000	2,843	0,301
	0,000	1,000	0,845	0,903	3,338
	0,000	0,301	0,000	2,705	2,468
	0,602	0,000	0,845	2,430	1,079
	0,000	0,000	0,699	0,477	0,699
	0,477	0,602	0,000	1,204	4,048
	0,000	2,330	2,664	2,307	2,505
	0,000	1,959	1,000	0,477	3,278
	T = 40 °C				
	$\sigma=2,45$ МПа	$\sigma=2,35$ МПа	$\sigma=2,24$ МПа	$\sigma=2,17$ МПа	$\sigma=2,09$ МПа
lgτ	0,000	0,000	2,664	2,348	3,439
	0,301	1,973	1,380	2,104	1,763
	1,041	1,176	0,301	1,301	2,373
	0,301	0,301	0,000	1,924	2,173

	0,699	0,000	0,000	2,068	0,477
	0,301	0,301	0,301	2,539	0,602
	0,301	0,000	0,778	0,477	1,447
	1,176	0,477	1,230	0,000	0,699
	T = 50 °C				
	$\sigma=2,20$ МПа	$\sigma=2,06$ МПа	$\sigma=1,94$ МПа	$\sigma=1,85$ МПа	$\sigma=1,46$ МПа
lgτ	0,477	0,000	1,000	2,664	1,380
	0,000	1,000	2,714	0,699	0,000
	0,000	0,301	3,091	2,606	1,301
	0,000	0,000	0,477	2,400	0,301
	0,000	0,903	0,477	0,903	0,699
	0,000	1,732	2,250	1,342	1,279
	0,000	0,845	0,954	3,302	1,146
	1,398	1,301	0,301	1,322	2,569

Полученные экспериментальные данные (таблица 1) были проверены на наличие грубых погрешностей по критерию Граббса. Также были найдены доверительные интервалы полученных экспериментальных значений. Полученные результаты средних значений и границы доверительного интервала сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Значения десятичного логарифма времени [с] при заданных напряжениях и температурах после статистической обработки данных

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.3>

Напряжение (σ), МПа	Среднее значение логарифма долговечности и границы доверительного интервала при температуре								
	30 °C			40 °C			50 °C		
	H**	C _p *	B***	H**	C _p *	B***	H**	C _p *	B***
2,51	-	0,135	0,555	-	-	-	-	-	-
2,46	0,166	0,953	1,740	-	-	-	-	-	-
2,45	-	-	-	-0,023	0,515	1,053	-	-	-
2,40	-	0,484	1,112	-	-	-	-	-	-
2,35	-	-	-	-0,172	0,529	1,229			
2,30	0,830	1,668	2,507	-	-	-	-	-	-
2,24	-	-	-	0,035	0,832	1,628	-	-	-
2,22	1,236	2,215	3,194	-	-	-	-	-	-
2,20	-	-	-	-	-	-	-0,325	0,068	0,461
2,17	-	-	-	0,793	1,595	2,397	-	-	-
2,09	-	-	-	0,773	1,622	2,470	-	-	-
2,06	-	-	-	-	-	-	0,102	0,760	1,419
1,94	-	-	-	-	-	-	0,528	1,408	22,88
1,85	-	-	-	-	-	-	1,088	1,905	2,722
1,76	-	-	-	-	-	-	0,343	1,084	1,826

Примечание: *C_p – средние значения величины десятичного логарифма времени в секундах; **H – нижняя граница доверительного интервала; ***B – верхняя граница доверительного интервала

По приведенным в таблице 2 статически обработанным данным построен график в координатах «lgτ – σ» (рисунок 2).

Из графика видно, что при исследуемых температурах зависимость долговечности (lgτ) от напряжения (σ) подчиняется линейной зависимости, при этом температурные прямые сходятся в «прямой пучок», т.е. наблюдается схождение в полюс при предельно высокой температуре, что является классическим представлением термофлуктуационной теории для данного материала.

По графику (рисунок 2) можно определить, что точка полюса сходится по оси абсцисс $\sigma = 2,75$ МПа и по оси ординат $\lg \tau = -1,38$ с. Прямолинейная зависимость $\lg \tau = f(\sigma)$ при различных температурах описывается уравнениями, приведенными ниже:

$$\text{при температуре } 30^{\circ}\text{C} - \lg \tau = -6,7073 \cdot (\sigma) + 17,041, \quad (2)$$

$$\text{при температуре } 40^{\circ}\text{C} - \lg \tau = -5,1805 \cdot (\sigma) + 12,882, \quad (3)$$

$$\text{при температуре } 50^{\circ}\text{C} - \lg \tau = -3,1033 \cdot (\sigma) + 7,134. \quad (4)$$

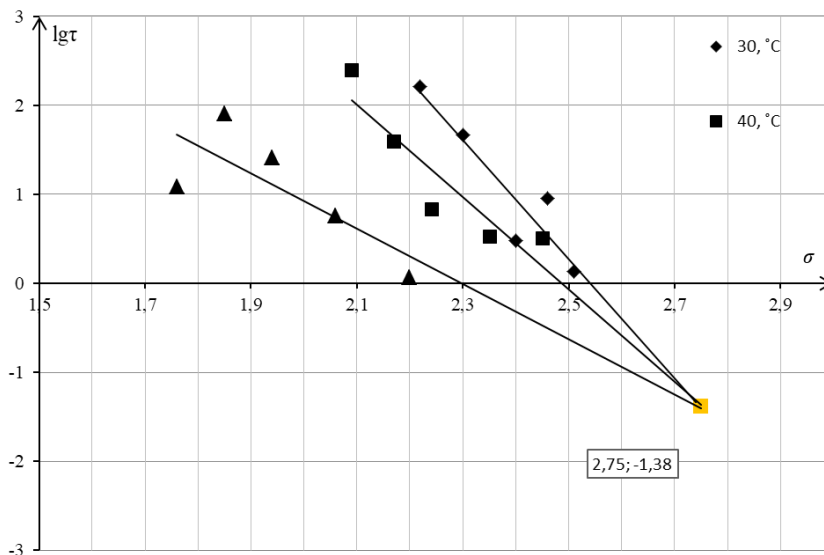


Рисунок 2 - Зависимость логарифма долговечности от напряжения для многослойных пластиковых сэндвич-панелей
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.4>

При перестроении графика « $\lg \tau - \sigma$ » в график « $\lg \tau - 1000/T$ » (рисунок 3) были выбраны напряжения, которые пересекают прямые температур в первой положительной четверти: 2, 2,1, и 2,2 МПа. Прямолинейная зависимость $\lg \tau = f(1000/T)$ для выбранных напряжений описывается уравнениями, приведенными ниже:

$$\text{для напряжения } 2 \text{ МПа: } \lg \tau = 13,4190 \cdot (1000/T) - 39,775, \quad (5)$$

$$\text{для напряжения } 2,1 \text{ МПа: } \lg \tau = 11,4190 \cdot (1000/T) - 34,648, \quad (6)$$

$$\text{для напряжения } 2,2 \text{ МПа: } \lg \tau = 9,6585 \cdot (1000/T) - 29,520. \quad (7)$$

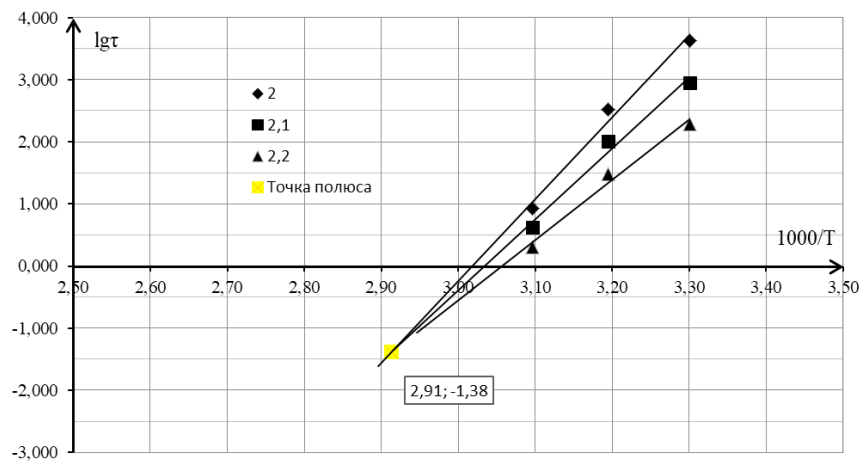


Рисунок 3 - Зависимость логарифма долговечности от обратной температуры увеличенной в 1000 раз для многослойных пластиковых сэндвич-панелей
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.5>

Из графика на рисунке 3 можно определить положение полюса по оси абсцисс $\frac{10^3}{T} = 2,91 \text{ K}^{-1}$ и по оси ординат $\lg \tau = -1,38 \text{ с}$. Исходя из этих данных определяются две первые константы: $\lg \tau_0 = -1,38 \text{ с}$ и $T_m = 343,64 \text{ К}$.

Для каждой прямой графика « $\lg \tau - 1000/T$ », которая характеризует фиксированное значение напряжения, определялась энергия активации. Энергия активации для напряжения 2,0 МПа составляет $U = 251,886 \text{ кДж/моль}$, для напряжения 2,1 МПа она составляет $U = 218,244 \text{ кДж/моль}$ и для напряжения 2,2 МПа – $U = 184,603 \text{ кДж/моль}$. По найденным значениям строится прямая в координатах « $U - \sigma$ » (рисунок 4). Данная прямая экстраполируется на ось ординат с целью определения начальной энергии активации. Таким образом, прямолинейная зависимость для образцов цельного сечения $U_0 = f(\sigma)$ описывается следующим уравнением:

$$U_0 = -336,41 \cdot (\sigma) + 924,71, R^2 = 1 \tag{8}$$

Из данного уравнения определяются последние две константы $U_0 = 924,71 \text{ кДж/моль}$ и $\gamma = 336,41 \text{ кДж/(МПа}\times\text{моль)}$.

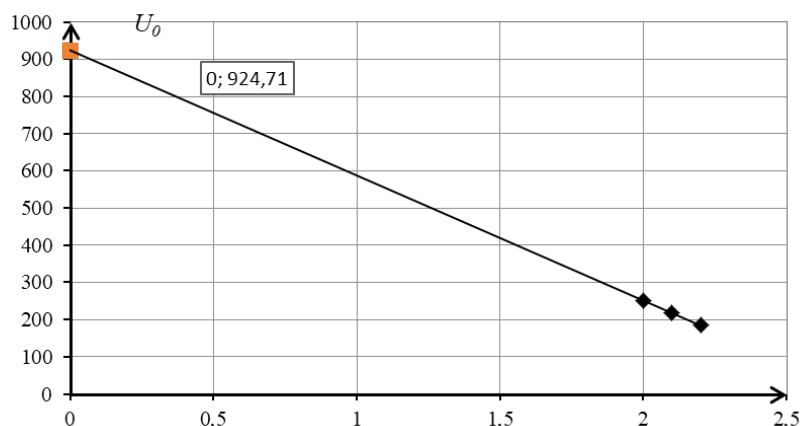


Рисунок 4 - Зависимость энергии активации процесса разрушения от напряжения для многослойных пластиковых сэндвич-панелей
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.2.6>

Далее найдем термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова для многослойных пластиковых сэндвич-панелей методом эталонного пучка.

Точка полюса (пересечение прямых температур (рисунок 2)) имеет координаты (2,75; -1,38). Следовательно, константа $\lg \tau_0$, являющаяся ординатой точки полюса, равна -1,38.

Изменение угловых коэффициентов уравнения прямых температур (2), (3) и (4) описывается следующим уравнением:

$$a = -17,601 \cdot (1000/T) + 51,276, \quad (9)$$

тогда при $a = 0$, $T_m = 343,24$ К.

Согласно методу эталонного пучка, термофлуктуационная константа U_0 определяется путем умножения значения эталонной константы на систему коэффициентов k_σ и k_k , а структурно-механическая константа γ определяется путем умножения эталонной константы на коэффициент k_k .

Коэффициент $k_k = (-17,601)/(-2,619) = 6,721$, коэффициент $k_\sigma = 2,75/10 = 0,275$. Тогда $U_0 = 500 \cdot 6,721 \cdot 0,275 = 924,14$ кДж/моль, а структурно-механическая константа $\gamma = 50 \cdot 6,721 = 336,05$ кДж/(МПа×моль).

Закключение

В итоге для многослойных пластиковых сэндвич-панелей классическим способом получены следующие термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова: $\lg \tau_0 = -1,38$ с, $T_m = 343,64$ К, $U_0 = 924,71$ кДж/моль, $\gamma = 336,41$ кДж/(МПа×моль).

Для многослойных пластиковых сэндвич-панелей методом эталонного пучка получены следующие термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова: $\lg \tau_0 = -1,38$ с, $T_m = 343,24$ К, $U_0 = 924,14$ кДж/моль, $\gamma = 336,05$ кДж/(МПа×моль).

Проведенные исследования на примере многослойных пластиковых сэндвич-панелей показали высокую сходимость двух методов определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Журков С.Н. Механические свойства материалов при больших скоростях деформирования / С.Н. Журков, Э.Е. Томашевский, Т.П. Санфирова // Журнал технической физики. — 1953. — № 6. — 933 с.
2. Ратнер С.Б. Прочность, долговечность и надежность конструкционных пластмасс / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. — М. : НИИТЭХИМ, 1983. — 74 с.
3. Журков С.Н. Микромеханика разрушения полимеров / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер // Проблемы прочности. — 1971. — № 2. — 45 с.
4. Слуцкер А.И. Формула Журкова // XV Петербургские чтения по проблемам прочности : сборник тезисов / А.И. Слуцкер. — СПб., 2005. — 174 с.
5. Журков С.Н. Временная зависимость прочности твердых тел / С.Н. Журков, Б.Н. Назруллаев // Журнал технической физики. — 1983. — № 10. — 1677 с.
6. Журков, С. Н. Проблема прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник Академии Наук СССР. — 1957. — № 11. — С. 78—84.
7. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. — М. : Наука, 1974. — 560 с.
8. Ярцев В.П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / В.П. Ярцев. — Воронеж, 1998. — 350 с.
9. Ратнер С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. — М. : Химия, 1992. — 320 с.
10. Патент № 2763483 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/32. Способ определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова методом эталонного пучка : № 2021106680 : заявл. 15.03.2021 : опубл. 29.12.2021 / А. В. Ерофеев, Т. И. Горохов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». — URL: findpatent.ru (дата обращения: 05.08.2024).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhurkov S.N. Mehanicheskie svoystva materialov pri bol'shikh skorostyah deformirovaniya [Mechanical properties of materials at high deformation rates] / S.N. Zhurkov, E.E. Tomashevsky, T.P. Sanfirova // Zhurnal tehnichekoj fiziki [Journal of Technical Physics]. — 1953. — № 6. — 933 p. [in Russian]
2. Ratner S.B. Prochnost', dolgovechnost' i nadezhnost' konstrukcionnyh plastmass [Strength, durability and reliability of structural plastics] / S.B. Ratner, V.P. Yartsev. — М. : НИИТЭХИМ, 1983. — 74 p. [in Russian]
3. Zhurkov S.N. Mikromekhanika razrusheniya polimerov [Micromechanics of polymer destruction] / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, A.I. Slutsker // Problemy prochnosti [Problems of Strength]. — 1971. — № 2. — 45 p. [in Russian]
4. Slutsker A.I. Formula Zhurkova [The Zhurkov Formula] // XV Peterburgskie Chteniya po Problemam Prochnosti [XV St. Petersburg Readings on Strength Problems] : Collection of Abstracts / A.I. Slutsker. — St. Petersburg, 2005. — 174 p. [in Russian]

5. Zhurkov S.N. Vremennaja zavisimost' prochnosti tverdyh tel [Time dependence of the strength of solids] / S.N. Zhurkov, B.N. Nazrullaev // Zhurnal tehnicheckoj fiziki [Journal of Technical Physics]. — 1983. — № 10. — 1677 p. [in Russian]
6. Zhurkov, S. N. Problema prochnosti tverdyh tel [The problem of the strength of solids] / S. N. Zhurkov // Vestnik Akademii Nauk SSSR [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR]. — 1957. — № 11. — P. 78—84. [in Russian]
7. Regel, V.R. Kineticheskaja priroda prochnosti tvèrdyh tel [Kinetic nature of the strength of solid bodies] / V.R. Regel, A.I. Slutsker, E.E. Tomashevsky. — M. : Nauka, 1974. — 560 p. [in Russian]
8. Yartsev V.P. Fiziko-tehnicheskie osnovy rabotosposobnosti organicheskikh materialov v detaljah i konstrukcijah [Physico-technical foundations of the operability of organic materials in parts and structures] : dissertation of the Doctor of Technical Sciences : 05.23.05 / V.P. Yartsev. — Voronezh, 1998. — 350 p. [in Russian]
9. Ratner S.B. Fizicheskaja mehanika plastmass. Kak prognozirujut rabotosposobnost'? [Physical mechanics of plastics. How do they predict performance?] / S.B. Ratner, V.P. Yartsev. — M. : Chemistry, 1992. — 320 p. [in Russian]
10. Patent № 2763483 C1 Rossijskaja Federacija, MPK G01N 3/32. Sposob opredelenija termofluktuaconnyh konstant obobshhennogo uravnenija Zhurkova metodom jetalonnogo puchka [Patent №. 2763483 C1 Russian Federation, IPC G01N 3/32. Method for determining the thermal fluctuation constants of the generalized Zhurkov equation by the reference beam method] : №. 2021106680 : application 15.03.2021 : publ. 29.12.2021 / A.V. Yerofeev, T. I. Gorokhov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University". — URL: findpatent.ru (accessed: 05.08.2024). [in Russian]