УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ХРУПКИХ ТЕЛ

Дунаев Владислав Игоревич
д-р физ.-мат. наук, профессор
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Молдаванов Сергей Юрьевич
канд. физ.-мат. наук, доцент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
sum-smsm@mail.ru

Лозовой Станислав Борисович
канд. физ.-мат. наук, доцент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Георгияди Владимир Георгиевич
аспирант
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Рассмотрена термофлуктуационная теория прочности твердых тел. Получены формулы для прогнозирования пределов длительной прочности. Установлено, что величина безопасного напряжения при сжатии зависит от физико-механических констант материала. Для ряда технических стекол получена численная оценка величины безопасных напряжений при сжатии.

Ключевые слова: ПРОЧНОСТЬ ТЕРМОУПРУГИХ ТЕЛ ПРИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ.

UDC 539.3

STUDY ON LONG-TERM STRENGTH OF BRITTLE SOLIDS

Vladislav Igorevich Dunaev
Dr. Sc. (Phys. and Math.), Prof.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia

Moldavanov Sergey Yurievich
Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia, sum-smsm@mail.ru

Lozovoy Stanislav Borisovich
Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia

Georgiyadi Vladimir Georgievich
PhD student
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia

Considered theory of termofluktuacion strength of solids. Formulas for predicting long-term strength limits. Set the value of a safe low voltage of compression depends on the physical and mechanical material constants. For a number of technical glass received the numerical estimation of compressive stresses safety.

Key words: STRENGTH OF THERMOELASTICS SOLIDS AT SMALL DEFORMATIONS, THE DURABILITY OF THE MATERIALS.

Разрушение твердых тел представляет собой процесс, происходящий во времени. Первоначальная стадия разрушения тела связана с постепенным накоплением повреждений. Накопление повреждений активируется внешними воздействиями и субмикродефектами, которые имеют макрочастицы твердого тела. Время разрушения отдельной макрочастицы можно получить исходя как из физических представлений о механизме разрушения, так и из различных феноменологических критериев разрушения.

Наиболее распространено физическое представление образования зоны повреждения или микротрещины в макрочастице твердого тела вследствие термофлуктуационного разрыва химический связей. Для определения долговечности различных материалов часто используют феноменологическую формулу Журкова [1]

$$t_p = \tau_0\, exp \frac{U_0 - \gamma'\sigma}{kT}.$$

где $\tau_0 = 10^{-12} - 10^{-13}$ c – период одного теплового колебания; U_0 – энергия активации разрушения связи; σ – напряжение; γ' – структурно-чувствительный коэффициент; k – постоянная Больцмана; T – температура. Формула Журкова основана на фундаментальном представлении о термофлуктуационном механизме разрушения твердых тел, однако приводит к конечному времени разрушения при отсутствии внешних напряжений.

В работе [2] была предложена термофлуктуационная теория прочности твердых тел. Основными гипотезами этой теории являются:

1) Считается справедливым принцип макроскопической определимости [3]. Из этого принципа следует, что, если на некотором интервале времени $0 \le \tau \le t$ заданы процесс нагружения $\sigma_{ij}(\tau)$, $\mu_{ijk}(\tau)$ . . . или процесс деформации $\varepsilon_{ij}(\tau)$, $\gamma_{ijk}(\tau)$ . . . , а также немеханические параметры $T(\tau)$. . . , то в любой момент времени t, вплоть до разрушения, состояние макрочастицы будет однозначно определено. Следовательно, тензоры напряжений $\sigma_{ij}(\tau)$, моментов $\mu_{ijk}(\tau)$ и температура $T(\tau)$ будут однозначными функционалами функций $\varepsilon_{ij}(\tau)$, $\gamma_{ijk}(\tau)$, $T(\tau)$ и наоборот. Нагружение макрочастицы сопровождается возникновением и развитием внутренних повреждений, накопление которых в некоторый момент времени приводит к ее разрушению.

2) Разрушение представляет собой необратимый процесс накопления повреждений в результате термофлуктуационного разрыва связей в поле внешних сил и других немеханических параметров. Время разруше-

ния является случайной величиной, распределенной в интервале $\left]0, t^*\right[$, где t^* определяется из условия нормировки

$$\int_0^{t^*} p(t)dt = 1 . \qquad (1)$$

Здесь $p(t)$ – плотность распределения случайной величины t, или вероятность необратимого разрушения связей в единицу времени.

Атомы или молекулы в твердом теле постоянно колеблются. В процессе разрушения эти кинетические единицы при разрыве связи преодолевают некоторый энергетический барьер. Пусть $\gamma(U_m - U)$ – высота этого энергетического барьера. Колеблющаяся кинетическая единица, обладающая внутренней энергией, достаточной для преодоления барьера, в состоянии действительно его преодолеть лишь в какую-то часть периода, пропорциональную множителю Больцмана

$$exp\left[-\frac{\gamma(U_m - U)}{kT(t)}\right].$$

Тогда вероятность разрыва связи в единицу времени равна:

$$w_- = \tau_0^{-1}\, exp\left[-\frac{\gamma(U_m - U)}{kT(t)}\right],$$

где τ_0 – период одного теплового колебания;

γ – эффективный объем разрушения;

U_m – максимальная внутренняя энергия связи;

U – внутренняя энергия колеблющейся единицы;

$U = U_0 + U\left[\sigma_{ij}(\tau), \mu_{ijk}(\tau)\ldots, T(\tau)\ldots\right]$ или $U = U_0 + U\left[\varepsilon_{ij}(\tau), \gamma_{ijk}(\tau)\ldots, T(\tau)\ldots\right]$.

Здесь U_0 – внутренняя средняя энергия в отсутствие воздействия напряжений, деформаций или других немеханических параметров. Внутренние энергии U_m и U отнесены к единице объема.

В твердом теле наряду с процессом разрыва связей происходит и процесс их восстановления. При безопасном уровне энергии поля внешних сил и других немеханических параметров при температуре $T(t)$ вероятности разрыва w_- и восстановления w_+ связей в единицу времени одинаковы. Исходя из принятого механизма разрыва связей следует:

1) система находится в состоянии динамического равновесия и общее число связей остается постоянным;

2) вероятность необратимого разрыва связей в единицу времени $p_0(t)$ равна нулю

$$p_0(t) = w_- - w_+ = 0;$$

$$w_- = w_+ = \tau_0^{-1}\, exp\left[-\frac{\gamma\left(U_m - U_0 - U\left[\sigma_{ij}^0(\tau), \mu_{jk}^0(\tau)\ldots, T(\tau)\ldots\right]\right)}{kT(t)}\right].$$

3) время необратимого разрыва связей t_0^* стремится к бесконечности, т. е. разрушения не происходит.

Здесь $\sigma_{ij}^0(\tau)$ и $\mu_{jk}^0(\tau)$ – тензоры безопасных напряжений и моментов.

При нагружении твердого тела вероятность разрыва связи равна:

$$w_- = \tau_0^{-1}\, exp\left[-\frac{\gamma\left(U_m - U_0 - U\left[\sigma_{ij}(\tau), \mu_{jk}(\tau)\ldots, T(\tau)\ldots\right]\right)}{kT(t)}\right],$$

а вероятность восстановления связи

$$w_- = \tau_0^{-1}\, exp\left[-\frac{\gamma\left(U_m - U_0 - U\left[\sigma_{ij}^0(\tau), \mu_{jk}^0(\tau)\ldots, T(\tau)\ldots\right]\right)}{kT(t)}\right].$$

Таким образом, динамическое равновесие системы нарушается и акты разрыва связей преобладают над актами их восстановления. Тогда вероятность необратимого разрыва связей в единицу времени равна:

$$p(t) = w_- - w_+ =$$

$$= B[T(t,\tau)]\left\{exp\left(\frac{\gamma U'\left[\sigma_{ij}(\tau), \ldots, T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right) - exp\left(\frac{\gamma U_0'\left[\sigma_{ij}^0(\tau), \ldots, T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right)\right\}. \quad (2)$$

$$B[T(t,\tau)] = \tau_0^{-1}\, exp\left\{-\frac{\gamma U^*[T(t,\tau)]}{kT(t)}\right\};$$

$$U^*[T(t,\tau)] = U_m - U_0 - U[0, 0, \ldots T(\tau)\ldots];$$

$$U'\left[\sigma_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]=U\left[\sigma_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]-U[0,0,\ldots T(\tau)\ldots]. \qquad (3)$$

Подставляя выражения (2) в условие (1), получаем уравнение для определения наибольшего времени длительной прочности твердых тел в точке с координатами x_i ($i=1,2,3$)

$$\int_0^{t^*} B[T(t,\tau)]\left\{exp\left(\frac{\gamma U'\left[\sigma_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right)-exp\left(\frac{\gamma U'_0\left[\sigma^0_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right)\right\}dt=1. \qquad (4)$$

Математическое ожидание времени разрушения будет равно

$$\langle t\rangle=\int_0^{t^*} tB[T(t,\tau)]\left\{exp\left(\frac{\gamma U'\left[\sigma_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right)-\right.$$

$$\left.-exp\left(\frac{\gamma U'_0\left[\sigma^0_{ij}(\tau),\ldots,T(\tau)\ldots\right]}{kT(t)}\right)\right\}dt. \qquad (5)$$

Аналогичные выражения могут быть записаны через тензоры деформаций $\varepsilon_{ij}(\tau)$, $\gamma_{ijk}(\tau)$.

Рассмотренная теория длительной прочности применима при сложном нагружении и сложном напряженном состоянии к сплошным средам общего вида (изотропным, анизотропным и т.д.), для которых существует функционал внутренней энергии U и определена связь между компонентами тензоров напряжений $\sigma_{ij}(\tau)$, моментов $\mu_{ijk}(\tau)$ и тензорами деформаций $\varepsilon_{ij}(\tau)$, $\gamma_{ijk}(\tau)$ вплоть до разрушения.

Внутреннюю энергию термоупругих изотропных тел при малых деформациях и малых приращениях температур представим в виде [4]:

$$u=U_0+\mu\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}-\frac{\lambda}{2}\varepsilon^2_{kk}+3\kappa\alpha T_0\varepsilon_{kk}-\frac{9}{2}\kappa\alpha^2\left(T^2-T_0^2\right)+\frac{c_\sigma}{2}\frac{\left(T^2-T_0^2\right)}{T_0}. \qquad (6)$$

где μ и λ – константы Лямэ;

c_σ – удельная теплоемкость;

α – коэффициент линейного теплового расширения;

$$U_0\approx c_\sigma T_0;\quad \kappa=\lambda+\frac{2}{3}\mu.$$

Все эти приведенные константы в общем случае зависят от температуры. Если пренебречь указанной зависимостью в рассматриваемом интервале температур, то с учетом соотношения между деформациями и напряжениями

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \alpha\left(T - T_0\right)\delta_{ij},$$

получаем внутреннюю энергию в напряжениях

$$U = c_\sigma T_0 + \frac{1+\nu}{2E}\sigma_{ij}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{2E}\sigma_{kk}^2 + T\alpha\sigma_{kk} + \frac{c_\sigma}{2}\frac{\left(T^2 - T_0^2\right)}{T_0}, \tag{7}$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Тогда, подставляя выражение (7) в уравнение (4), имеем

$$\int_0^{t^*}\tau_0^{-1}\, exp\left\{\frac{\gamma}{kT(t)}\left(U_m - c_\sigma T_0\left[1+\left(\frac{T^2}{2T_0^2}-\frac{1}{2}\right)\right]\right)\right\}\left\{exp\frac{\gamma U'}{kT(t)} - exp\frac{\gamma U_0'}{kT(t)}\right\}dt = 1. \tag{8}$$

Здесь обозначено

$$U' = \frac{1+\nu}{2E}\sigma_{ij}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{2E}\sigma_{kk}^2 + T\alpha\sigma_{kk}; \quad U_0' = \frac{1+\nu}{2E}\sigma_{ij}^0\sigma_{ij}^0 - \frac{\nu}{2E}\left(\sigma_{kk}^0\right)^2 + T\alpha\sigma_{kk}^0. \tag{9}$$

В выражениях (8) и (9) предполагается, что температура зависит от времени.

Подробно рассмотрим случай одноосного напряженного состояния, когда $\sigma_{11} = const$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$, $T = const$; $T \neq T_0$. Тогда из уравнения (4) с учетом выражений (9) получаем формулу для определения наибольшего времени длительной прочности t^* при постоянном напряжении

$$t^* = B^{-1}(T)\left\{exp\frac{\gamma}{kT}\left(\frac{\sigma^2}{2E}+\alpha T\sigma\right) - exp\frac{\gamma}{kT}\left(\frac{\sigma_0^2}{2E}+\alpha T\sigma_0\right)\right\}^{-1}, \tag{10}$$

где $B^{-1}(T) = \tau_0\, exp\left\{\frac{\gamma}{kT}\left(U_m - c_\sigma T_0\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{T^2}{T_0^2}-1\right)\right]\right)\right\}$.

Рассмотренная теория длительной прочности твердых тел позволяет установить связь между уровнем безопасных напряжений при сжатии и физико-механическими характеристиками материала . Из уравнения (10) следует, что для случая одноосного сжатия, когда $\sigma_{11} = const = -\sigma$, время разрушения материала будет стремиться к бесконечности если

$$exp\frac{\gamma}{kT}\left(\frac{\sigma^2}{2E} - \alpha T\sigma\right) - exp\frac{\gamma}{kT}\left(\frac{\sigma_0^2}{2E} - \alpha T\sigma_0\right) = 0 .$$

Отсюда получаем [5]

$$\sigma_0^{c(1)} = 2E\alpha T . \qquad (11)$$

Аналогичным образом, записывая уравнения для внутренней энергии (9) для случая двухосного сжатия [6], когда $\sigma_{11} = \sigma_{22} = const = -\sigma$, $\sigma_{33} = \sigma_{12} =$ $= \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$, имеем

$$\sigma_0^{c(2)} = \frac{2E\alpha T}{1-\nu} . \qquad (12)$$

Для случая всестороннего сжатия, когда $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = const = -\sigma$, $\sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$, получаем

$$\sigma_0^{c(3)} = \frac{2E\alpha T}{1-2\nu} . \qquad (13)$$

Неорганические стекла являются наиболее типичными представителями хрупких тел. Прочностные характеристики стекол зависят от их химического состава и могут быть приближенно определены в соответствии с общепризнанной методикой, изложенной в справочнике [5]

$$\sigma_u^t = f_1P_1 + f_2P_2 + \ldots + f_nP_n ; \qquad (14)$$

$$\sigma_u^c = F_1P_1 + F_2P_2 + \ldots + F_nP_n , \qquad (15)$$

где σ_u^t – кратковременный предел прочности стекла при одноосном растяжении;

σ_u^c – кратковременный предел прочности стекла при одноосном сжатии ;

$P_1, P_2 \ldots, P_n$ – содержание соответствующего окисла в неорганическом стекле в весовых процентах;

$f_1, f_2 \ldots, f_n$– расчетные коэффициенты для вычисления предела прочности стекла на растяжение;

$F_1, F_2 \ldots, F_n$ – то же для вычисления предела прочности стекла на растяжение.

Физико-механические характеристики неорганических стекол (модуль упругости E, коэффициент Пуассона ν, коэффициент линейного теплового расширения α) также зависят от их химического состава и могут быть найдены по формулам аддитивности

$$E = E_1 P_1 + E_2 P_2 + \ldots + E_n P_n ; \quad (16)$$

$$\alpha = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \ldots + \alpha_n P_n ; \quad (17)$$

$$\nu = m_1 P_1 + m_2 P_2 + \ldots + m_n P_n ; \quad (18)$$

где $E_1, E_2 \ldots, E_n$ – удельные константы для вычисления модуля упругости неорганического стекла;

$\alpha_1, \alpha_2 \ldots, \alpha_n$ – то же для определения коэффициента линейного теплового расширения;

$m_1, m_2 \ldots, m_n$ – то же для вычисления коэффициента Пуассона.

Удельные константы для окислов, входящих в состав неорганических стекол определяются по справочнику по производству стекла [7]. В качестве примера рассмотрим вычисление физико-механических констант для стекла №20 (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав и удельные константы для стекла №20

Окисел	P_i %	σ_u^t кг/мм^2	σ_u^c кг/мм^2	E_i кг/мм^2	m_i	$\alpha_i \cdot 10^7$ град$^{-1}$
SiO_2	75,7	0,090	1,23	70	0,00153	0,270
B_2O_3	6,9	0,065	0,90	60	0,00284	0,033
Al_2O_3	5,2	0,050	1,00	150	0,00175	1,670
CaO	1,3	0,200	0,20	70	0,00416	1,670
BaO	3,6	0,050	0,62	70	0,00365	1,000
Na_2O	6,2	0,020	0,60	100	0,00431	3,330
K_2O	1,2	–	0,05	70	0,00390	2,830

Подставляя приведенные данные в формулы (14–18) получаем следующие значения физико-механических характеристик стекла №20:

$$\sigma_u^t = 8{,}09 \text{ кг/мм}^2 = 80{,}9 \text{ МПа}; \quad \sigma_u^c = 110{,}30 \text{ кг/мм}^2 = 1103{,}0 \text{ МПа};$$

$$E = 7540 \text{ кг/мм}^2 = 0{,}754 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \nu = 0{,}194 ; \quad \alpha = 59 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}.$$

Отношение кратковременных пределов прочности для рассматриваемого стекла равно

$$\sigma_u^c / \sigma_u^t = 1103{,}0/80{,}9 = 13{,}63 .$$

Полученная оценка предела прочности при одноосном сжатии достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными о несущей способности образцов из стекла №20 при кратковременном нагружении [7]. Нагружение образцов на воздухе происходило в среднем за 10 минут. При проведении эксперимента наблюдался значительный разброс пределов прочности от $\sigma_{u\,min}^c = 472{,}6$ МПа до $\sigma_{u\,max}^c = 921{,}5$ МПа. Среднее значение предела прочности стекла при одноосном сжатии при 95% доверительном интервале равно $\sigma_{u\,cp}^c = 729{,}2$ МПа. Следовательно, прочностные характеристики, полученные по формулам (14-15), можно рассматривать в качестве «мгновенных» пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии соответственно.

Используя формулы (11–12), можно вычислить пределы длительной прочности при сжатии [6] для ряда технических стекол, выпускаемых промышленностью (табл. 2).

Таблица 2 – Пределы длительной прочности неорганических стекол

Марка стекла	$E \cdot 10^{-5}$ МПа	К-нт Пуассона ν	$\alpha \cdot 10^7$ град$^{-1}$	Предел длительной прочности (МПа)		
				Одноосное сжатие $\sigma_0^{c(1)}$	Двухосное сжатие $\sigma_0^{c(2)}$	Трехосное сжатие $\sigma_0^{c(3)}$
КФЗ	0,632	0,204	106	392,6	493,0	753,3
Ф-1	0,570	0,224	77	257,3	331,5	466,0
ТФЗ	0,534	0,239	93	290,8	382,3	557,9
ТК-3	0,777	0,267	84	382,6	522,1	821,7
ТК-5	0,743	0,276	83	316,3	498,7	804,7
№20	0,745	0,194	59	262,0	325,1	428,1
№23	0,757	0,223	88	390,2	502,1	703,8
№29	0,662	0,208	76	294,6	372,1	505,0
ЦЛ	0,737	0,207	80	345,3	435,6	589,9
59	0,745	0,201	48	209,6	262,3	350,3
КС-34	0,721	0,212	76	321,0	407,6	558,1
ДГ-2	0,764	0,185	47	210,5	258,1	333,6
13в	0,672	0,197	50	196,9	245,2	324,9
Пирекс	0,714	0,185	36	150,7	185,0	239,4

В работе [9] показано, что предельные кривые, построенные в соответствии с рассматриваемым критерием прочности, в плоскости главных напряжений $\sigma_1 0 \sigma_2$ представляют систему вложенных эллипсов (рис. 1), равнонаклоненных к осям σ_1 и σ_2

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu\sigma_1\sigma_2 + 2\alpha TE(\sigma_1 + \sigma_2) = \sigma_u^t\langle t\rangle\left(2\alpha TE + \sigma_u^t\langle t\rangle\right). \quad (19)$$

где $\sigma_u^t\langle t\rangle$ – предел прочности материала при заданном математическом ожидании времен разрушения макрочастицы $\langle t\rangle$ при растяжении.

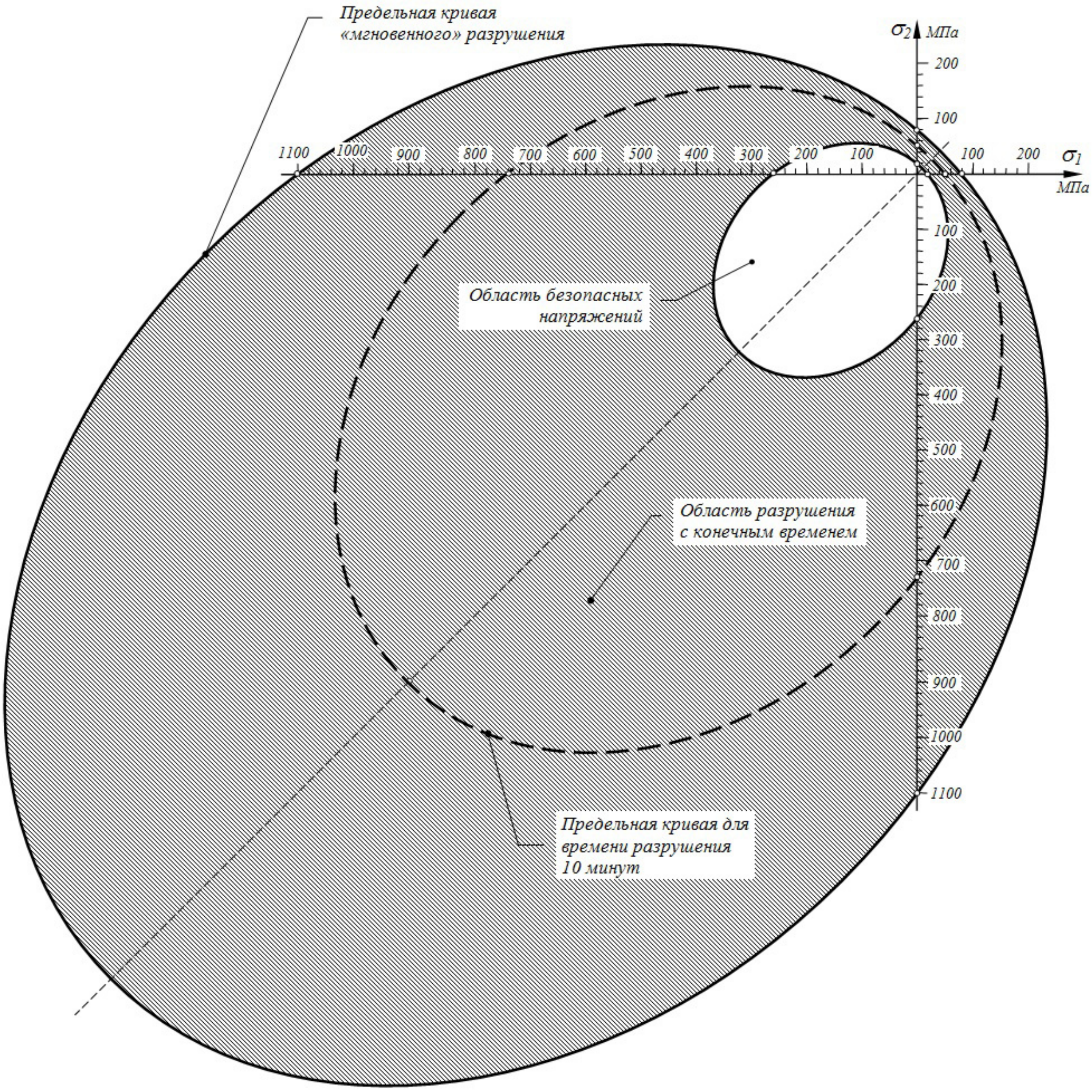

Рисунок 1

Предположим, что соотношение пределов прочности стекла при сжатии и растяжении не зависит от времени нагружения. Тогда для математического ожидания разрушения равного $\langle t \rangle = 10$ минутам получаем

$$\sigma_u^t = 729{,}2/13{,}63 = 53{,}50 \text{ МПа.}$$

Если же время разрушения материала стремится к бесконечности, то используя формулу (11) и данные таблицы 2, находим предел длительной прочности стекла №20 при одноосном растяжении

$$\sigma_0^t = 262{,}0/13{,}63 = 19{,}22 \text{ МПа.}$$

Предельные кривые, построенные по полученным значения пределов прочности для различного математического ожидания времени разрушения материала, показаны на рисунке 1.

Список литературы

1. Журков С.Н., Назруллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журнал технической физики. 1983. Т. 23. № 10. С. 1677.
2. Дунаев И.М. Разрушение эластомеров // Механика эластомеров: Сборник научных работ; Краснод. политехн. ин-т, Краснодар, 1981. С. 24-33.
3. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1978. 278 с.
4. Коваленко А.Д. Термоупругость. Киев: Высшая школа, 1975. 216 с.
5. Молдаванов С.Ю. Прогнозирование длительной прочности термоупругих тел при сжатии // Сборник научных трудов Sworld, Одесса, 2013. Т. 3. № 2. С. 21-26.
6. Молдаванов С.Ю., Дунаев В.И. Вычисление предела длительной прочности неорганических стекол при сжатии // Наука. Техника. Технологии (политехнических вестник). 2013. № 1-2. С. 13-18.
7. Справочник по производству стекла / Под ред. И.И. Китайгородского. М.: Госстройиздат. 1963. Т. 1. 1026 с.
8. Писаренко Г.С., Родичев Ю.М., Солуянов В.Г. Сопротивление разрушению при сжатии технического стекла в условиях длительного контактного нагружения // Проблемы прочности. 1974. №1. С. 39-42
9. Дунаев И.М., Дунаев В.И. Критерий прочности материалов, учитывающий накопление повреждений // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 2. С. 26-27.

References

1. Zhurkov S.N., Nazrullaev B.N. Vremennaja zavisimost prochnosti tverdyh tel // Zhurnal tehnicheskoj fiziki. 1983. T. 23. № 10. S. 1677.
2. Dunaev I.M. Razrushenie jelastomerov // Mehanika jelastomerov: Sbornik nauchnyh rabot; Krasnod. politehn. in-t, Krasnodar, 1981. S. 24-33.
3. Iljushin A.A. Mehanika sploshnoj sredy. M.: Izd-vo MGU, 1978. 278 s.
4. Kovalenko A.D. Termouprugost. Kiev: Vysshaja shkola, 1975. 216 s.

5. Moldavanov S.Yu. Prognozirovanie dlitel'noj prochnosti termouprugih tel pri szhatii // Sbornik nauchnyh trudov Sworld, Odessa, 2013. T. 3. № 2. S. 21-26.

6. Moldavanov S.Yu., Dunaev V.I. Vychislenie predela dlitelnoj prochnosti neorganicheskih stekol pri szhatii // Nauka. Tehnika. Tehnologii (politehnicheskih vestnik). 2013. № 1-2. S. 13-18.

7. Spravochnik po proizvodstvu stekla / Pod red. I.I. Kitajgorodskogo. M.: Gosstrojizdat. 1963. T. 1. 1026 s.

8. Pisarenko G.S., Rodichev Yu.M., Solujanov V.G. Soprotivlenie razrusheniju pri szhatii tehnicheskogo stekla v uslovijah dlitelnogo kontaktnogo nagruzhenija // Problemy prochnosti. 1974. №1. S. 39-42/

9. Dunaev I.M., Dunaev V.I. Kriterij prochnosti materialov, uchityvajushhij nakoplenie povrezhdenij // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. 2002. № 2. S. 26-27.