

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРОВЕЛЬНЫХ БИТУМНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

**В.П. Ярцев<sup>1</sup>, М.В. Долженкова<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Конструкции зданий и сооружений» (1);  
«Архитектура и строительство зданий» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
dmv20101@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой*

**Ключевые слова и фразы:** битумно-полимерные материалы; долговечность; кинетическая (термофлуктуационная) концепция; линии теплового старения; одноосное растяжение; пенетрация; УФ-облучение.

**Аннотация:** Разработана методика прогнозирования работоспособности кровельных битумно-полимерных материалов на основе термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твердых тел. Выявлены закономерности разрушения и деформирования кровельных битумных композитов при разных видах нагружения (растяжении, срезе, сжатии и пенетрации) в широком диапазоне заданных постоянных напряжений и температур.

---

Одним из важнейших эксплуатационных параметров кровельных материалов является долговечность (потенциальный срок службы). Для многих битумных материалов она, как правило, невысокая (порядка 10...15 лет). Уже через несколько лет эксплуатации мягкая битумная кровля начинает протекать. Разрушение происходит путем механических повреждений в процессе монтажа и эксплуатации, а также в результате старения при воздействии окружающей среды.

Основными эксплуатационными параметрами, определяющими долговечность любого конструкционного материала являются нагрузка и температура. Кроме того, в течение всего срока эксплуатации большинство строительных материалов, включая и кровельные, подвергаются воздействию агрессивных факторов внешней среды (активные жидкости, УФ-облучение), что значительно снижает их долговечность [2].

Влияние температуры и силового воздействия на долговечность битумных кровельных композитов можно учесть с позиций термоактивационной (кинетической) концепции разрушения и деформирования.

В современном строительном производстве необходим надежный и простой метод прогнозирования долговечности битумных кровельных материалов, основанный на изучении закономерностей их разрушения и деформирования в широком эксплуатационном диапазоне нагрузок и температур с учетом дополнительного воздействия климатических и активных физико-химических факторов.

При исследовании долговечности кровельных битумных композитов использована методика математического планирования эксперимента, разработанная Л.О. Буниной для блочных термопластов. Она позволяет получить необходимую информацию при минимальном количестве испытываемых образцов.

Изучены закономерности разрушения и деформирования кровельных битумных композитов при разных видах нагружения (растяжении, срезе, сжатии и пенетрации) в широком диапазоне заданных постоянных напряжений и температур.

Время до разрушения или заданной деформации (долговечность  $t$ ) для ряда органических строительных материалов описывается обобщенной формулой Журкова–Александрова, физически обоснованной и экспериментально подтвержденной С.Б. Ратнером и В.П. Ярцевым [3, 4]

$$t = t_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (1)$$

где при разрушении  $t_m = \tau_m$ , деформировании  $t_m = \theta_m$  – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов);  $U_0$  – максимальная энергия активации разрушения (размягчения), кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механическая константа;  $T_m$  – предельная температура существования твердого тела (термостойкость или теплостойкость), К;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К).

В этом случае экспериментальные результаты представляют собой семейство веерообразных прямых, сходящихся в полюс.

Для некоторых органических материалов формула (1) не реализуется. Зависимости принимают вид параллельных прямых или кривых линий, описываемых уравнениями:

для первого случая

$$t = t^* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta \sigma) \quad (2)$$

и для второго

$$t = B \sigma^{-m} \exp \frac{U}{RT}, \quad (3)$$

где  $t^*$ ,  $U$ ,  $B$ ,  $m$  – эмпирические константы;  $\beta$  – структурно-силовой фактор.

Наблюдаются также случаи обращения пучка прямых, когда зависимости образуют полюс не при малых, а при больших значениях долговечности. Для описания такой зависимости В.П. Ярцевым предложена формула

$$t = t_m^* \exp \left[ \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

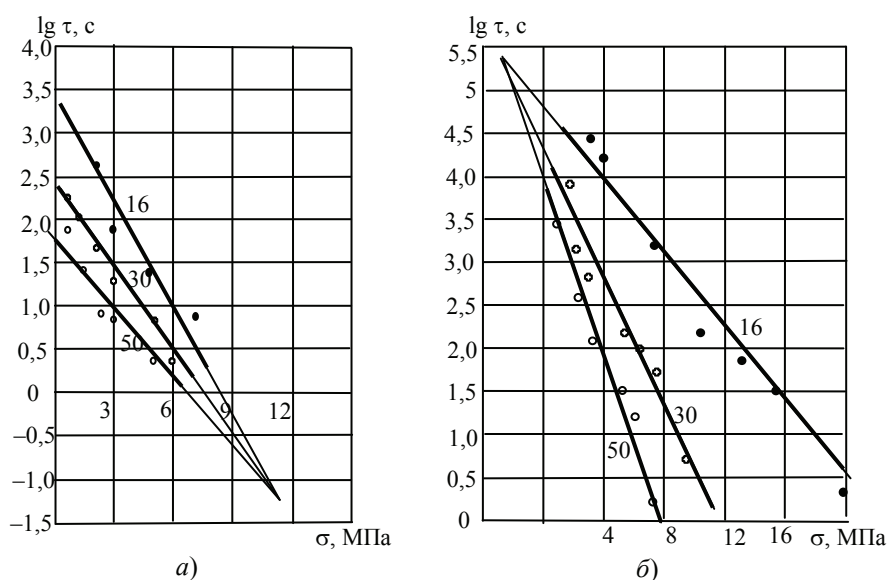
где  $t_m^*$ ,  $U_0^*$ ,  $\gamma^*$  и  $T_m^*$  – эмпирические константы.

Кинетическая концепция о механизме разрушения и деформирования твердых тел и формулы (1) – (4) дают основу для прогнозирования долговечности битумно-полимерных кровель различного состава.

Для выявления закономерностей разрушения битумно-полимерных композитов при одноосном растяжении в режиме заданных постоянных напряжений и температуре ( $18 \pm 1$ ) °С провели длительные испытания 14 видов кровель. Результаты показали, что временные зависимости прочности в полулогарифмических координатах при постоянной температуре для рубероида, рубемаста, стекломаста, стеклобита, биполя, бикроста, ондулина и битумной черепицы имеют линейный характер (1-я группа), а для линокрома, унифлекса и техноэласта – нелинейный (2-я группа). Нелинейность указывает на нестабильность структуры кровельных материалов 2-й группы под нагрузкой.

При вариации заданных постоянных температур зависимости для первой группы кровельных материалов образуют семейства прямых в координатах  $\lg t - \sigma$  (рис. 1). Веерообразные прямые могут сходиться в «прямой пучок» (см. рис. 1, а) или «обратный пучок» (см. рис. 1, б).

Для определения констант, входящих в уравнения (1) и (4), зависимости перестроили в координаты  $\lg t - 10^3/T$ . Константы определили графоаналитическим способом по программе Constanta. Их величины для кровельных материалов с разной основой и вяжущим приведены в табл. 1.



**Рис. 1. Зависимость долговечности при одноосном растяжении от напряжения и температуры (цифры у прямых, °С) для рубероида РКК-420А (а) и стекломаста (б)**

Для рубероида разных марок при одноосном растяжении величины констант  $U_0$  и  $\tau_m$  близки. Существенно различаются  $T_m$  – предельная температура существования твердого тела и  $\gamma$  – структурно-механическая константа. Для битумных композитов  $T_m$  связана с температурой размягчения битума (перехода его в жидкое состояние). У рубемаста  $U_0$  увеличивается в 1,5 раза,  $\gamma$  уменьшается в 2–3 раза,  $\tau_m$  повышается на порядок и  $T_m$  близка кровельному рубероиду. В комплексе такое поведение констант определяет существенный рост долговечности рубемаста по сравнению с рубероидом [3].

Таблица 1

**Влияние вида нагрузки на физические и эмпирические константы битумных композитов**

Материал	Вид нагрузки	Константы			
		$U_0 (U_0^*)$ , кДж/моль	$\gamma (\gamma^*)$ , кДж/(МПа·моль)	$\tau_m (\tau_m^*)$ , с	$T_m (T_m^*)$ , К
Рубероид РКК-420А	Растяжение	90	14	$10^{-1,2}$	400
	Срез	90	40	$10^{-0,4}$	434
Рубероид РПП-300Б	Растяжение	96	20	$10^{-1}$	343
Рубемаст		145	5,9	$10^{-0,15}$	385
Стекломаст	Растяжение	30	-8	$10^{5,3}$	263
	Срез	30	-25	$10^{6,2}$	208
Черепица битумная	Растяжение	35	-12	$10^{5,3}$	238
	Срез	120	70	$10^{-0,5}$	387
Бикрост	Растяжение	195	35	$10^{-1,2}$	368

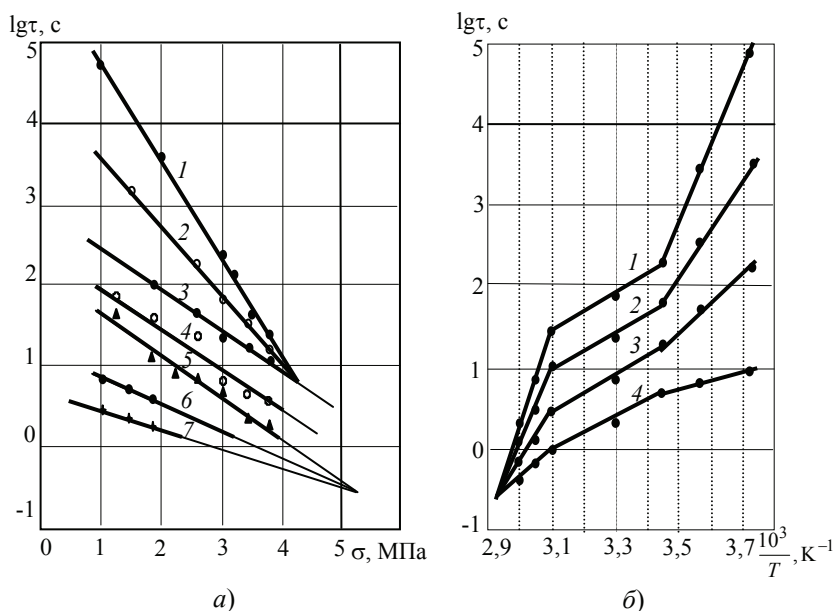
Для стекломаста и битумной черепицы при одноосном растяжении характер зависимости меняется, что, по-видимому, связано со стекловолонистой основой. Рассчитанные для них константы не имеют физического смысла. Однако для битумной черепицы  $\gamma^*$  меньше, а  $T_m^*$  больше чем у стекломаста, что также определяет более высокую долговечность битумной черепицы и указывает на некую физическую основу эмпирических констант.

Влияние вида нагружения на константы, определяющие долговечность битумно-полимерной кровли изучали при одноосном растяжении и срезе для рубероида, стекломаста, стеклобита и битумной черепицы. Полученные зависимости для всех исследованных материалов имеют линейный характер и образуют семейства веерообразных прямых, сходящихся в одну точку («прямой пучок» и «обратный пучок»). За исключением стеклобита, разрушение которого в широком интервале температур происходит по сложному механизму (рис. 2).

Значения констант уравнений (1) и (4) при разных видах нагружения представлены в табл. 1 и 2. Из таблицы 1 видно, что для рубероида и стекломаста величины  $U_0$  при растяжении и срезе совпадают, а  $\gamma$  изменяется в одинаковое число раз  $\sim 3$ , что подтверждает результаты, полученные ранее В.П. Ярцевым с сотрудниками, при разрушении ряда органических строительных материалов. Величина  $\tau_m$  при срезе на порядок больше;  $T_m$  для рубероида и стекломаста падает на  $35 \dots 45$  °С.

Для битумной черепицы при изменении вида нагрузки меняется характер зависимости долговечности от напряжения и температуры, что, по-видимому, связано с изменением структуры материала  $\gamma$  в процессе испытания растяжением. Константы для битумной черепицы при растяжении близки к стекломасту, а при срезе – рубероиду.

Зависимости долговечности от напряжения и обратной температуры при одноосном растяжении стеклобита (см. рис. 2) могут быть разделены по температурным интервалам на три участка: 1 – от  $-5$  до  $+18$  °С; 2 – от  $+18$  до  $+50$  °С и 3 – от  $+50$  до  $+60$  °С. На первом и третьем участках зависимости описываются урав-



**Рис. 2. Зависимость долговечности стеклобита при одноосном растяжении от напряжения, МПа (а) и температуры (б):**

а) 1 –  $-5^\circ$ ; 2 –  $8^\circ$ ; 3 –  $18^\circ$ ; 4 –  $30^\circ$ ; 5 –  $50^\circ$ ; 6 –  $55^\circ$ ; 7 –  $60^\circ$

нением (1), на втором – уравнением (2). Аналогичные зависимости получены и при срезе. Таким образом, при прогнозе долговечности эксплуатационный интервал температур необходимо разбить на три области: хрупкого, хрупко-пластического и пластического разрушения. Наиболее предпочтительной является область хрупко-пластического разрушения. В этой области структура максимально стабильна. Она не зависит от напряжения и температуры. Значения констант стеклобита представлены в табл. 2, показывающей, что в области хрупкого разрушения  $U_0$  соответствует энергии активации разрыва химических связей стекловолокна, в области пластического разрушения  $U_0$  возрастает за счет вклада энергии адгезионного взаимодействия связующего и основы. При срезе в хрупкой и хрупко-пластической областях  $U_0$  и  $U$  падают, поскольку при этом виде нагружения не происходит проскальзывания стекловолокна в связующем и, следовательно, адгезионное взаимодействие не участвует в процессе разрушения.

При срезе структурный коэффициент  $\beta$  увеличивается в 1,5 раза, а константа  $\gamma$  в пластической области – в 2,5 раза, что соответствует результатам ранее полученным В.П. Ярцевым с сотрудниками. Предельная температура критического разрушения  $T_m$  соответствует в хрупкой области начальной температуре размягчения, а в пластической – температуре плавления.

Битумно-полимерные кровли в ряде зданий в процессе эксплуатации практически не подвергаются длительным силовым воздействиям. Поэтому основным параметром, определяющим их долговечность, является температура, приводящая к тепловому старению материала. Процесс разрушения в отсутствие нагрузки (тепловое старение) можно описать уравнением

$$\tau = \tau_m \exp \left[ \frac{E_a}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (5)$$

где  $E_a = U_0$  – максимальная энергия активации термохимической деструкции.

Физико-химические константы  $\tau_m$  и  $T_m$ , входящие в уравнения (5) аналогичны и равны константам уравнения (1). Из уравнения (5) видно, что тепловое старение определяется в основном химической природой материала. Влияние физической структуры проявляется в изменении констант  $\tau_m$  и  $T_m$ .

Время теплового старения можно определить из схемы, представленной на рис. 3. Для ее построения необходимо минимум при трех постоянных температурах  $T_1, T_2, T_3$  и трех напряжениях  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  определить время до разрушения исследуемого материала при любом простом виде нагружения (растяжении или срезе битумной кровли). Полученные при температурах  $T_1, T_2, T_3$  линейные зависимости экстраполируем на ось ординат при  $\sigma = 0$ . Точки пересечения с осью дают нам время теплового старения при заданных температурах испытания.

Таблица 2

**Значения физических и эмпирических констант стеклобита**

Вид нагрузки	Температурный интервал, °С	$U_0$ , кДж/моль	$U$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(моль·МПа)	$\beta$ , МПа <sup>-1</sup>	$\tau_m$ , с	$T_m$ , К
Растяжение	-5 ... +18	236	–	56	–	10 <sup>0,6</sup>	307
	+18 ... +50	–	43,5	–	0,5	–	–
	+50 ... +60	288	–	56	–	10 <sup>-0,6</sup>	341
Срез	+18 ... +30	209	–	54	–	10 <sup>0,15</sup>	326
	+30 ... +50	–	25,1	–	0,73	–	–
	+50 ... +60	524	–	134	–	10 <sup>-0,15</sup>	333

Для прогноза времени теплового старения битумных кровель в широком интервале температур зависимости в координатах  $\lg \tau - \sigma$  необходимо перестроить в координаты  $\lg \tau - 10^3/T$  (см. рис. 3, б). Константы  $\tau_m$ ,  $U_0$  определяют графоаналитическим способом по программе Constanta. Зная величину  $U_0 = E_a$ , строим «линию теплового старения», по которой при любой заданной температуре можно определить предельное время эксплуатации битумной кровли.

Процесс разрушения кровельных материалов с нестабильной структурой описывается формулами (2) – (4). Для них по аналогичной схеме также можно построить «линии теплового старения».

При эксплуатации битумно-полимерные кровельные материалы могут воспринимать длительные сжимающие и контактные нагрузки, приводящие к деформации и нарушению целостности покрытия. В связи с этим были изучены закономерности деформирования кровельных битумных композитных материалов сжатием и пенетрацией в режиме заданных постоянных напряжений и температур. При сжатии фиксировали время достижения заданной деформации (5, 10, 15 и 20 %). Полученные зависимости  $\lg \theta - \sigma$  и  $\lg \theta - 10^3/T$  для всех уровней деформации имеют линейный характер и описываются уравнением (1). Значения физических констант для стекломата представлены в табл. 3, где показано, что с ростом деформации  $U_0$  и  $\gamma$  падают, а  $\theta_m$  и  $T_m$  меняются экстремально. По-видимому, деформация 10 % является переходной от эластической к пластической (необратимой).

При пенетрации в качестве индентора использовали стальной шарик  $\varnothing 10$  мм и стальной конус с углом в вершине  $65^\circ$ . Пример зависимостей скорости деформирования битумных кровельных материалов при пенетрации представлен на рис. 4. Аналогичные зависимости получены для других кровельных материалов (ондулина, бикроста, унифлекса, биполя и линокрома).

Графоаналитическим дифференцированием по программе Grafddiffer построены зависимости в координатах  $\lg v_0 - 10^3/T$  ( $v_0$  – начальная скорость). Для всех исследуемых материалов они имеют линейный характер, образуя «прямой пучок» (см. рис. 4, в), описываемый уравнением

$$v = v_{0m} \exp \left[ \frac{U_{0д} - \gamma_d N}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_{мд}} \right) \right], \quad (6)$$

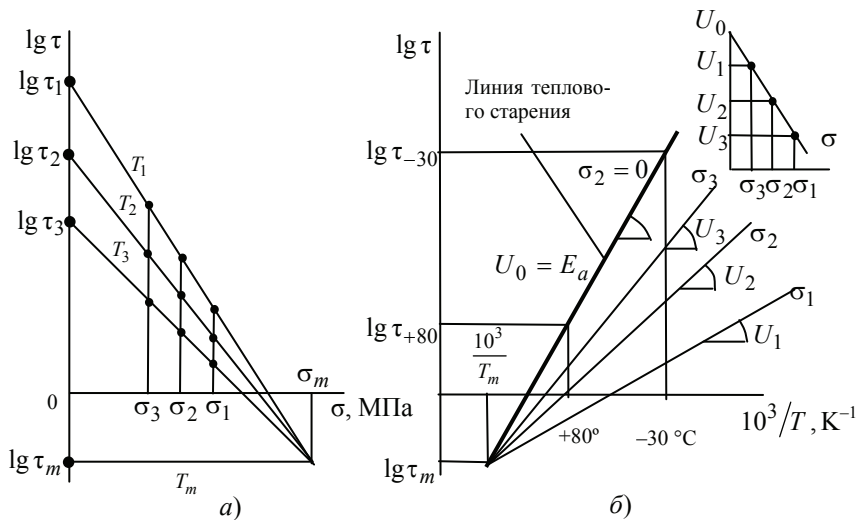


Рис. 3. Схема построения линии теплового старения битумной кровли, процесс разрушения которой описывается уравнением (1)

Значения физических констант при сжатии стекломата

Величина относительной деформации, %	Константы			
	$\theta_m$ , с	$T_m$ , К	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(моль·МПа)
5	$10^{-1,25}$	355	462	660
10	$10^{-1,35}$	388	220	259
15	$10^{-0,6}$	379	186	205
20	$10^{-0,35}$	379	156	176

где  $v$  – скорость деформирования, мм/с;  $v_{0m}$  – предельная начальная скорость, мм/с;  $U_{0д}$  – максимальная энергия активации деформирования, кДж/моль;  $\gamma_d$  – структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа);  $T_{мд}$  – температура размягчения, К;  $N$  – усилие вдавливания при пенетрации, МПа.

Для всех зависимостей по программе Constanta определены величины констант уравнения (6).

Результаты показали, что форма контртела на константы оказывает существенно меньшее влияние, чем вид кровельного материала.

Зная величины констант, для всех исследованных материалов по формуле (6) можно рассчитать значения скоростей пенетрации в широком диапазоне нагрузок и температур.

Исследовано влияние УФ-облучения на кратковременные и длительные механические характеристики битумных кровель. Установлено, что для бикроста,

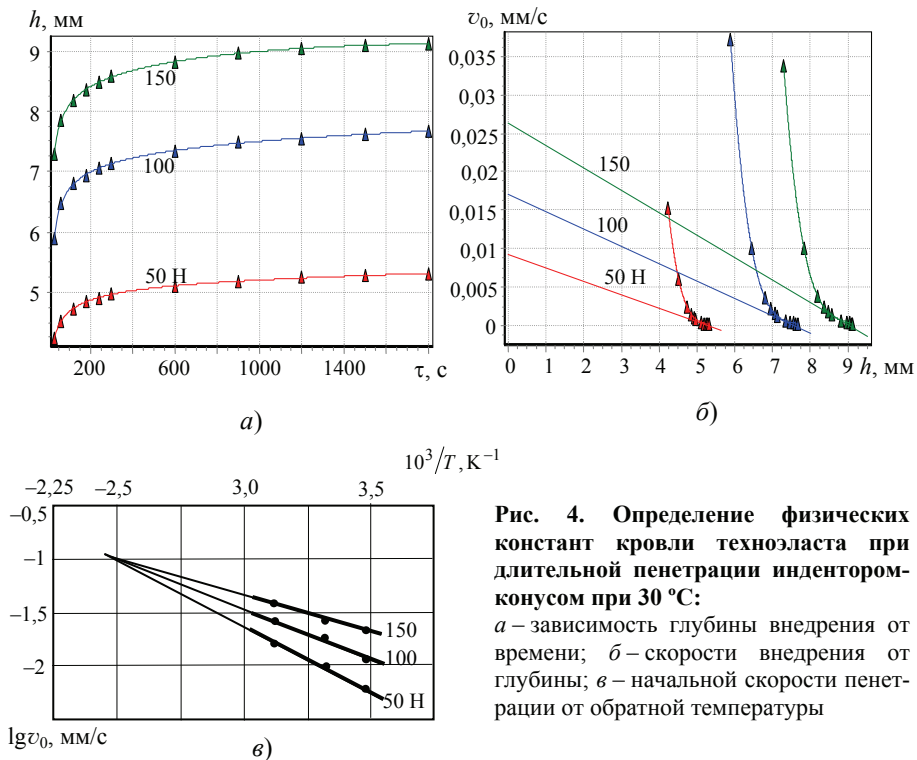


Рис. 4. Определение физических констант кровли технозлата при длительной пенетрации индентором-конусом при 30 °С:

$a$  – зависимость глубины внедрения от времени;  $b$  – скорости внедрения от глубины;  $c$  – начальной скорости пенетрации от обратной температуры



стекломаста и стеклобита прочность после 12 часов облучения лампами ПРК падает на 20...25 %, после 100 часов облучения приближается к исходной. Таким образом, УФ-облучение экстремально влияет на прочность кровельных материалов, что, по-видимому, связано с физико-химическими процессами, протекающими при их фотодеструкции.

Длительные испытания при температуре  $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$  проводили при одноосном растяжении и срезе после 108 часов облучения. Результаты показали, что облучение не влияет на долговечность стеклобита, снижает ее у бикроста и по-разному проявляется у стекломаста – ниже напряжения 1,75 МПа долговечность падает, а выше растет. Последнее, по-видимому, связано с комбинацией процессов фото- и механодеструкции в данном кровельном материале. Для бикроста при одноосном растяжении получены зависимости  $\lg t - \sigma$  при вариации заданных постоянных температур. Величины констант  $U_0$  и  $\gamma$  после облучения существенно возрастают. Это указывает на изменение кинетики механохимической деструкции, приводящей к разрушению физической структуры. В результате на  $30^\circ\text{C}$  снижается температура размягчения  $T_m$  и увеличивается период колебания кинетических единиц за счет их укрупнения (образования ассоциатов), что ранее наблюдалось для термопластов. Величина предельной прочности  $\sigma_m = U_0/\gamma$  после облучения бикроста падает на 15 %.

Влияние жидких агрессивных сред на прочность и долговечность битумной кровли изучали на примере рубероида РПП-300Б и бикроста. Прочность рубероида в воде и масле вначале падает, а после 70 часов выдержки начинает расти; в бензине, наоборот, в течение суток растет, а затем линейно падает во времени. Оценку долговечности проводили после выдержки бикроста в течение 1, 3 и 18 часов в машинном масле. Установлено, что после контакта с машинным маслом характер зависимости не меняется, но долговечность резко падает и далее не зависит от времени выдержки. Влияние агрессивной среды при прогнозировании долговечности можно учесть введением эмпирических поправок.

Циклические температурно-влажностные воздействия проводили в режимах замораживания – оттаивания и замачивания – высушивания. Результаты кратковременных испытаний показали снижение прочности порядка 15...20 % после 70 циклов воздействия.

При длительных испытаниях после 70 циклов долговечность падает, но зависимости  $\lg t - \sigma$  при комнатной температуре сохраняют линейный характер, что позволяет определить поправки, учитывающие влияние климатических воздействий.

По формулам (1) – (4) выполнен расчет долговечности исследованных материалов при заданных значениях основных эксплуатационных параметров (напряжения и температуры) в условиях воздействия внешних физико-химических и климатических факторов. Построены диаграммы, позволяющие прогнозировать долговечность в широком диапазоне нагрузок и температур [1].

Полученные результаты подтвердили надежность и точность методики прогнозирования долговечности битумно-полимерных кровельных композитов, основанной на положениях термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования.

#### *Список литературы*

1. Долженкова, М.В. Прогнозирование долговечности битумных кровельных материалов / М.В. Долженкова, В.П. Ярцев // Жилищ. стр.-во. – 2005. – № 1. – С. 9.
2. Ярцев, В.П. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность кровельных битумных материалов / В.П. Ярцев, М.В. Долженкова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т.10, № 4Б. – С. 1088–1093.



3. Ярцев, В.П. Оценка качества битумной кровли по изменению прочностных и деформационных характеристик / В.П. Ярцев, М.В. Долженкова // Кровел. и изоляц. материалы. – 2005. – № 3. – С. 66.

4. Ратнер, С.Б. Термофлуктуационные закономерности истирания полимеров / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев // Теория трения, износа и проблемы стандартизации : сб. науч. трудов / Приокское кн. изд-во. – Брянск, 1978. – С. 150–162.

---

## Durability Prognostication of Roofing Bitumen-Polymer Composites

V.P. Yartsev, M.V. Dolzhenkova

*Departments: "Construction of Buildings and Structures" (1);  
"Architecture and Building Construction" (2), TSTU; dmv20101@yandex.ru*

**Key words and phrases:** bitumen-polymer durability; kinetic (thermo fluctuation) conception; lines of thermal aging; monoaxial stretching; penetration; UV irradiation.

**Abstract:** The prognostication method for durability of roofing bitumen-polymer materials based on the thermo fluctuation concept of destruction and deformation of solids has been developed. The regularities of the destruction and deformation of asphalt roofing compounds in different types of loading (tension, shear, compression and penetration) in a wide range of specified constant stresses and temperatures have been revealed.

---

## Prognostizierung der Haltbarkeit des bitumenpolymerischen Dachverbundwerkstoffes

**Zusammenfassung:** Es ist die Methodik der Prognostizierung der Arbeitsfähigkeit der bitumenpolymerischen Dachmaterialien auf der Grundlage der Thermofluktionssonzeptionen der Zerstörung und des Deformierens der festen Körper entwickelt. Es sind die Gesetzmäßigkeiten der Zerstörung und des Deformierens des Dachbitumenverbundwerkstoffes bei verschiedenen Arten der Beaufschlagung (des Dehnens, des Schnittes, der Kompression und der Penetration) im breiten Umfang der aufgegebenen ständigen Anstrengungen und der Temperaturen gezeigt.

---

## Prévision de la longévité des composites de toit de bitume et de polymère

**Résumé:** Est présentée la méthode de la prévision de la capacité du travail des matériaux de toit de bitume et de polymère à la base de la conception de thermofluctuation de la destruction et de la déformation des corps solides. Sont déduites les régularités de la destruction et de la déformation des composites de toit de bitume et de polymère lors de différents types du chargement (distension, coupe, compression et pénétration) dans une large gamme des tensions et des températures données.

---

**Авторы:** *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкции зданий и сооружений»; *Долженкова Марина Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Леденев Виктор Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».