



*Л.И. Огородов<sup>1</sup>, В.А. Шапкина<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup>Вологодский государственный университет

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ ПОСЛЕ МНОГОЛЕТНЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ**

Представлены механические характеристики при растяжении и сжатии двух композиционных материалов на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином после многолетнего (до 48 лет) естественного старения образцов. Сопоставляются результаты испытаний с данными аналогичных опытов на образцах композитов в состоянии поставки и после старения 18–19 лет.

Композиты, полимерная основа, дисперсные наполнители, многолетнее старение, механические характеристики, растяжение, сжатие.

При переработке, эксплуатации и хранении полимерные композиционные материалы подвергаются действию многочисленных физических и химических факторов. Это создает условия для инициирования и развития в них химических и физических превращений, которые влияют на механические характеристики материалов. В работе [1] выявлено неоднозначное влияние длительности старения на кратковременное и длительное сопротивление полимерных и полимерных композиционных материалов, что необходимо учитывать при оценке сопротивления конструктивных элементов. Исследования деформационных и прочностных свойств полимерных и полимерных композиционных материалов были продолжены в работах [2, 3, 5].

В настоящей работе изложены результаты исследования кратковременного и длительного сопротивления композитов К-211-2 и К-18-36 на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином соответственно после многолетнего (до 48 лет) естественного старения образцов материалов.

Для проведения экспериментов использовались образцы композитов К-211-2 и К-18-36, прошедшие многолетнее (до 48 лет) естественное старение.

Полученные данные помогут скорректировать прогнозирование изменения механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях длительного старения.

**Цели работы:** получить экспериментальные результаты испытаний на растяжение и сжатие при нормальных и повышенных температурах композиционных материалов на полимерной основе с дисперсным наполнением частицами разной природы К-211-2 и К-18-36, образцы которых прошли многолетнее (47 и 48 лет) естественное старение (без доступа солнечного света) на кратковременную прочность в широком диапазоне скоростей деформирования и на длительную прочность; сопоставить результаты с данными испытаний образцов этих композитов в со-

стоянии поставки и после 18 лет естественного старения.

### **Задачи работы:**

- дать заключение по влиянию времени длительного естественного старения на механические характеристики исследуемых композиционных материалов при растяжении и при сжатии;

- выделить особенности деформирования и разрушения композиционных материалов с разными дисперсными наполнителями при испытаниях с заданными скоростями деформирования и температурами;

- оценить влияние на механические характеристики скорости деформирования и температуры опытов;

- сравнить результаты испытания длительной прочности композитов и дать заключение о возможности определения поврежденности композитов по величине предельных напряжений при кратковременной догрузке после предварительного длительного нагружения.

Композиционные материалы К-211-2 и К-18-36 получены на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином соответственно. Степень наполнения композитов составляла 30...35 %. Образцы материалов проходили естественное старение в условиях отапливаемого складского помещения (температура в пределах 18...25 °С при влажности не более 50 %) в течение 47 и 48 лет. Опыты на растяжение выполнялись на плоских образцах с длиной рабочей части 100 мм, шириной 25,4 мм и толщиной 0,8...1,4 мм. Образцы на сжатие были выполнены в виде кубов со сторонами 8×8×8 мм.

Испытания на растяжение и сжатие композиционных материалов при нормальной и повышенной температуре проводили на испытательных машинах INSTRON 5966 и INSTRON 8001. Установки обеспечивают нагружение образцов с заданной неизменной скоростью перемещения захвата и измерение нагрузки с низкой погрешностью (не более 1 % измеряемой

величины). Шероховатость рабочей поверхности площадок машины INSTRON 8001 соответствуют  $R_A \leq 0,32$  мкм по ГОСТ 2789-73. Нижняя площадка машины снабжена шарнирной опорой. Испытания при повышенных температурах проводили с установленной термической камерой, которая обеспечивает равномерный прогрев образца до заданной температуры и поддержание ее на протяжении всего испытания. Проведение испытаний и обработка полученных данных выполнена по ГОСТ 25.602-80 и ГОСТ 11262-80.

Результаты настоящих испытаний сопоставлены с данными аналогичных опытов на образцах композитов в состоянии поставки (до старения) и после старения (18–19 лет).

В таблицах 1–3 представлено сравнение механических характеристик композитов К-211-2 и К-18-36 в различных состояниях (I – состояние поставки, II – после естественного старения 18 лет, III – после старения 47 лет), испытанных на растяжение при различных температурах и скоростях деформирования (V).

Таблица 1

**Механические характеристики композитов в различных условиях**

| V,<br>мм/мин | Марка<br>композита | Состояние | Механические характеристики при растяжении |                           |            |                        |                           |            |                        |                           |            |
|--------------|--------------------|-----------|--------------------------------------------|---------------------------|------------|------------------------|---------------------------|------------|------------------------|---------------------------|------------|
|              |                    |           | 20 °С                                      |                           |            | 60 °С                  |                           |            | 100 °С                 |                           |            |
|              |                    |           | $\sigma_{ut}$ ,<br>МПа                     | $\varepsilon_{ut}$ ,<br>% | Ер,<br>МПа | $\sigma_{ut}$ ,<br>МПа | $\varepsilon_{ut}$ ,<br>% | Ер,<br>МПа | $\sigma_{ut}$ ,<br>МПа | $\varepsilon_{ut}$ ,<br>% | Ер,<br>МПа |
| 2            | К-211-2            | I         | 41,89                                      | 0,6                       | 6860       | 35,9                   | 0,7                       | -          | 29,3                   | 0,3                       | -          |
|              |                    | II        | 46,06                                      | 1,3                       | 4560       | 22,1                   | 1,4                       | 3100       | 9,8                    | 2,1                       | 600        |
|              |                    | III       | 44,94                                      | 0,9                       | 4840       | 45,9                   | 1,3                       | 3646       | -                      | -                         | -          |
|              | К-18-36            | I         | 35,90                                      | 0,6                       | 5440       | 30,8                   | 0,6                       | -          | 25,4                   | 0,3                       | -          |
|              |                    | II        | 37,7                                       | 1,0                       | 4400       | 27,8                   | 1,0                       | 2770       | 11,4                   | 0,9                       | 1280       |
|              |                    | III       | 31,13                                      | 0,6                       | 5030       | 38,5                   | 1,2                       | 3270       | -                      | -                         | -          |
| 20           | К-211-2            | I         | 43,70                                      | 0,6                       | 7140       | 41,4                   | 0,8                       | -          | 39,9                   | 0,4                       | -          |
|              |                    | II        | 46,48                                      | 0,9                       | 5470       | 32,2                   | 1,1                       | 2930       | 12,4                   | 1,3                       | 550        |
|              |                    | III       | 44,90                                      | 1,0                       | 4530       | 45,9                   | 1,3                       | 3650       | -                      | -                         | -          |
|              | К-18-36            | I         | 36,00                                      | 0,6                       | 5840       | 32,7                   | 0,5                       | -          | 27,0                   | 0,4                       | -          |
|              |                    | II        | 37,67                                      | 0,6                       | 5060       | 25,1                   | 1,2                       | 2280       | 15,2                   | 1,1                       | 1320       |
|              |                    | III       | 38,80                                      | 0,8                       | 5030       | 35,1                   | 0,9                       | 3990       | -                      | -                         | -          |
| 100          | К-211-2            | I         | 48,91                                      | 0,6                       | 7860       | 46,1                   | 0,7                       | -          | 34,7                   | 0,2                       | -          |
|              |                    | II        | 35,58                                      | 0,9                       | 5450       | 24,0                   | 0,9                       | 2660       | 19,3                   | 1,4                       | 1660       |
|              |                    | III       | 42,80                                      | 0,9                       | 4650       | -                      | -                         | -          | -                      | -                         | -          |
|              | К-18-36            | I         | 39,79                                      | 0,6                       | 6440       | 37,8                   | 0,7                       | -          | 33,6                   | 0,2                       | -          |
|              |                    | II        | 28,87                                      | 0,5                       | 5340       | 27,7                   | 1,1                       | 2520       | 15,1                   | 1,0                       | 1690       |
|              |                    | III       | 25,90                                      | 0,5                       | 4300       | -                      | -                         | -          | -                      | -                         | -          |

Таблица 2

**Изменение механических характеристик композитов при растяжении в зависимости от продолжительности естественного старения образцов**

| V, мм/мин | Марка<br>композита | Длительность<br>старения | Изменение в % механических характеристик |       |                    |               |                    |
|-----------|--------------------|--------------------------|------------------------------------------|-------|--------------------|---------------|--------------------|
|           |                    |                          | 20 °С                                    |       |                    | 60 °С         |                    |
|           |                    |                          | $\sigma_{ut}$                            | Ер    | $\varepsilon_{ut}$ | $\sigma_{ut}$ | $\varepsilon_{ut}$ |
| 2         | К-211-2            | 18 лет                   | +10                                      | -33,5 | +53,8              | -38,4         | +100,0             |
|           |                    | 47 лет                   | +7,3                                     | -29,4 | +50,0              | +27,8         | +87,7              |
|           | К-18-36            | 18 лет                   | +5,0                                     | -19,1 | +66,7              | -9,7          | +66,7              |
|           |                    | 47 лет                   | -13,3                                    | -7,5  | 0,0                | +7,7          | +100,0             |
| 20        | К-211-2            | 18 лет                   | +6,4                                     | -23,4 | +50,0              | -32,2         | +37,5              |
|           |                    | 47 лет                   | +2,7                                     | -36,6 | +66,7              | +10,9         | +62,5              |
|           | К-18-36            | 18 лет                   | +4,7                                     | -13,4 | 0,0                | -23,2         | +140,0             |
|           |                    | 47 лет                   | +7,8                                     | -13,9 | +33,3              | +7,3          | +80,0              |
| 100       | К-211-2            | 18 лет                   | -27,2                                    | -30,7 | +50,0              | -47,9         | +28,6              |
|           |                    | 47 лет                   | -12,5                                    | -40,8 | +50,0              | -             | -                  |
|           | К-18-36            | 18 лет                   | -27,4                                    | -18,6 | -16,7              | -26,7         | +57,1              |
|           |                    | 47 лет                   | -34,9                                    | -33,2 | -16,7              | -             | -                  |

Изменение механических характеристик композитов в зависимости от скорости деформирования

| V, мм/мин | Материал | Состояние материала | Изменение (в %) механических характеристик с увеличением скорости деформирования при температурах |       |               |       |               |        |
|-----------|----------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------|-------|---------------|--------|
|           |          |                     | 20 °С                                                                                             |       | 60 °С         |       | 100 °С        |        |
|           |          |                     | $\sigma_{ut}$                                                                                     | $E_p$ | $\sigma_{ut}$ | $E_p$ | $\sigma_{ut}$ | $E_p$  |
| 20        | К-211-2  | I                   | +4,3                                                                                              | +4,1  | +15,3         | -     | +36,2         | -      |
|           |          | II                  | +0,9                                                                                              | +20,0 | +45,7         | -5,5  | +26,5         | +58,3  |
|           |          | III                 | ~0,0                                                                                              | -6,4  | 0,0           | +1,1  | -             | -      |
|           | К-18-36  | I                   | +0,3                                                                                              | +7,4  | +5,8          | -     | +6,3          | -      |
|           |          | II                  | ~0,0                                                                                              | +15,0 | +8,9          | -17,7 | +33,3         | +3,1   |
|           |          | III                 | +24,6                                                                                             | 0,0   | -8,8          | +22   | -             | -      |
| 100       | К-211-2  | I                   | +16,8                                                                                             | +14,6 | +28,4         | -     | +18,4         | -      |
|           |          | II                  | -22,8                                                                                             | +19,5 | +8,6          | -14,2 | +96,9         | +176,7 |
|           |          | III                 | -4,8                                                                                              | -3,9  | -             | -     | -             | -      |
|           | К-18-36  | I                   | +1,8                                                                                              | +18,4 | +22,3         | -     | +33,3         | -      |
|           |          | II                  | -23,4                                                                                             | +21,4 | -0,4          | -9,0  | +32,4         | +32,0  |
|           |          | III                 | -16,8                                                                                             | -14,5 | -             | -     | -             | -      |

Таблица 4

Механические характеристики композита К-18-36 после 18 и 48 лет естественного старения

| V, мм/мин | $\sigma_{uc}$ |       | $\epsilon_{uc}$ |       | $E_c$ , МПа |      | $\epsilon_f$ |       |
|-----------|---------------|-------|-----------------|-------|-------------|------|--------------|-------|
|           | II            | III   | II              | III   | II          | III  | II           | III   |
| 0,05      | 137,5         | 136,2 | 0,073           | 0,076 | 2590        | 2330 | 0,020        | 0,031 |
| 0,4       | 147,4         | 148,7 | 0,066           | 0,081 | 3660        | 2540 | 0,021        | 0,033 |
| 2,0       | 156,8         | 156,7 | 0,072           | 0,080 | 2860        | 2510 | 0,018        | 0,028 |
| 20,0      | 162,5         | 168,6 | 0,069           | 0,081 | 2850        | 2660 | 0,012        | 0,064 |
| 60,0      | 166,1         | 180,3 | 0,067           | 0,090 | 3200        | 2620 | 0,008        | 0,029 |
| 100,0     | 167,2         | 184,0 | 0,056           | 0,094 | 4200        | 2560 | 0,004        | 0,055 |

Предел прочности композитов при растяжении со скоростями деформирования 2 мм/мин и 20 мм/мин в результате длительного естественного старения 18 лет и 47 лет повысился по сравнению с данными испытаний в состоянии поставки (за исключением одной серии испытаний композита К-18-36) в среднем на 6 %, а при растяжении со скоростью деформирования 100 мм/мин снизился в результате старения в среднем на 26 %. Дополнительное старение образцов композитов в течение 29 лет не приводит к значительному изменению предела прочности композитов К-211-2 и К-18-36.

Значения модуля упругости композита К-211-2 при исследованных скоростях деформирования и температуре 20 °С в результате старения снизились на 32 %, композита К-18-36 – на 17 %. Более длительное старение влияет на этот показатель с учетом дисперсии результатов незначительно.

Испытания композитов при температуре 60 °С показали увеличение модуля упругости в результате продления времени старения (на 29 лет) на 33 %.

Предельная деформация при растяжении (при температуре 20 °С) композитов увеличивалась в среднем на 42 % по сравнению с деформациями образцов в состоянии поставки за исключением результата испытаний композита К-18-36 при V=100 мм/мин, где

отмечается снижение деформации на 17 %. В условиях испытания композитов при температуре 60 °С V=2 мм/мин и V=20 мм/мин, аналогичное сравнение показало увеличение на 90 %. Влияние на предельные деформации при растяжении композитов К-211-2 и К-18-36 более длительного, по сравнению с 18 годами, естественного старения образцов менее существенно.

В таблицах 4–9 приводятся результаты испытаний композитов К-211-2 и К-18-36 при сжатии и дается сравнение механических характеристик материалов в зависимости от длительности старения образцов, скорости деформирования и температуры опытов.

Предел прочности образцов композита К-211-2 при сжатии со скоростями деформирования от 0,05 до 100 мм/мин в результате дополнительного времени естественного старения от 18 до 48 лет увеличился в среднем на 12 %, предельные деформации повысились в среднем на 51 %, а модуль упругости при сжатии уменьшился в среднем на 18 %. Для композита К-18-36 эти механические характеристики изменились в среднем на 4 %, 26 % и 20 %. Относительная остаточная деформация при разрушении композитов увеличивалась значительно, достигая увеличения в среднем на 220 %.

Таблица 5

**Механические характеристики композита К-211-2 после 18 и 48 лет естественного старения**

| V, мм/мин | $\sigma_{uc}$ |       | $\epsilon_{uc}$ |       | $E_c$ , МПа |      | $\epsilon_r$ |       |
|-----------|---------------|-------|-----------------|-------|-------------|------|--------------|-------|
|           | II            | III   | II              | III   | II          | III  | II           | III   |
| 0,05      | 184,4         | 175,2 | 0,158           | 0,147 | 2630        | 2240 | 0,088        | 0,100 |
| 0,4       | 191,8         | 212,0 | 0,111           | 0,175 | 3180        | 2690 | 0,041        | 0,127 |
| 2,0       | 225,2         | 223,1 | 0,154           | 0,185 | 3200        | 2690 | 0,082        | 0,131 |
| 20,0      | 204,7         | 225,7 | 0,127           | 0,166 | 3450        | 2790 | 0,068        | 0,099 |
| 60,0      | 216,2         | 255,5 | 0,080           | 0,171 | -           | 2910 | -            | 0,104 |
| 100,0     | 185,9         | 257,2 | 0,074           | 0,142 | 4020        | 2950 | 0,004        | 0,084 |

Таблица 6

**Изменение механических характеристик при естественном старении от 18 до 48 лет**

| Марка композита | V, мм/мин | Изменение характеристик |                 |             |              |
|-----------------|-----------|-------------------------|-----------------|-------------|--------------|
|                 |           | $\sigma_{uc}$           | $\epsilon_{uc}$ | $E_c$ , МПа | $\epsilon_r$ |
| К-211-2         | 0,05      | -5                      | -7              | -15         | +14          |
|                 | 0,4       | +10                     | +58             | -15         | +210         |
|                 | 2,0       | +1                      | +20             | -16         | +60          |
|                 | 20,0      | +10                     | +31             | -19         | +46          |
|                 | 60,0      | +18                     | +114            | -           | -            |
|                 | 100,0     | +38                     | +92             | -27         | +95          |
| К-18-36         | 0,05      | +1                      | +4              | -10         | +55          |
|                 | 0,4       | +1                      | +23             | -31         | +57          |
|                 | 2,0       | 0                       | +11             | -12         | +56          |
|                 | 20,0      | +4                      | +17             | -7          | +433         |
|                 | 60,0      | +8                      | +34             | -18         | +262         |
|                 | 100,0     | +10                     | +68             | -39         | +1275        |

Таблица 7

**Механические характеристики композитов при повышенных температурах после 48 лет естественного старения**

| V, мм/мин | T, °C | К-211-2             |                 |             |              | К-18-36             |                 |             |              |
|-----------|-------|---------------------|-----------------|-------------|--------------|---------------------|-----------------|-------------|--------------|
|           |       | $\sigma_{uc}$ , МПа | $\epsilon_{uc}$ | $E_c$ , МПа | $\epsilon_r$ | $\sigma_{uc}$ , МПа | $\epsilon_{uc}$ | $E_c$ , МПа | $\epsilon_r$ |
| 2         | 60    | 192,4               | 0,123           | 3040        | 0,093        | 116,3               | 0,059           | 3050        | 0,057        |
|           | 100   | 128,4               | 0,219           | 2300        | 0,194        | 91,3                | 0,062           | 2620        | 0,059        |
| 20        | 60    | 194,7               | 0,139           | 3150        | 0,108        | 123,5               | 0,065           | 3150        | 0,060        |
|           | 100   | 136,7               | 0,240           | 2650        | 0,217        | 91,2                | 0,084           | 2260        | 0,083        |
| 100       | 60    | 203,0               | 0,127           | 3380        | 0,082        | 135,2               | 0,065           | 3330        | 0,061        |
|           | 100   | 154,0               | 0,229           | 2890        | 0,203        | 88,5                | 0,083           | 1740        | 0,079        |

Таблица 8

**Изменение (в %) механических характеристик композитов с повышением температуры испытаний по сравнению с данными, определенными при температуре 20 °C**

| Материалы | V, мм/мин | $\sigma_{uc}$ , МПа |        | $\epsilon_{uc}$ |        | $E_c$ , МПа |        | $\epsilon_r$ |        |
|-----------|-----------|---------------------|--------|-----------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
|           |           | 60 °C               | 100 °C | 60 °C           | 100 °C | 60 °C       | 100 °C | 60 °C        | 100 °C |
| К-211-2   | 2         | -13,8               | -42,4  | -33,5           | +18,4  | +13,0       | -14,5  | -29,0        | +48,1  |
|           | 20        | -13,7               | -39,4  | -16,3           | +44,6  | +12,9       | -5,0   | +9,1         | +119,2 |
|           | 100       | -21,1               | -49,1  | -10,6           | +61,3  | +14,6       | -2,0   | -2,4         | +141,7 |
| К-18-36   | 2         | -26,2               | -42,1  | -262,2          | -22,5  | +21,5       | +4,4   | +85,7        | +110,7 |
|           | 20        | -26,7               | -45,9  | -19,8           | +3,7   | +18,4       | -15,0  | -6,2         | +29,7  |
|           | 100       | -26,5               | -51,9  | -30,8           | +11,7  | +30,0       | -32,0  | +10,9        | +43,6  |

Изменение механических характеристик композитов в зависимости от скорости деформирования по сравнению с результатами опытов при скорости 2 мм/мин

| T, °C | V, мм/мин | Изменение механических характеристик (%) |                 |       |               |                 |       |
|-------|-----------|------------------------------------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|
|       |           | K-211-2                                  |                 |       | K-18-36       |                 |       |
|       |           | $\sigma_{uc}$                            | $\epsilon_{uc}$ | $E_c$ | $\sigma_{uc}$ | $\epsilon_{uc}$ | $E_c$ |
| 20    | 0,05      | -21,5                                    | -20,5           | -16,7 | -13,1         | -5,0            | -7,2  |
|       | 0,4       | -5,0                                     | -5,4            | 0,0   | -5,1          | +1,2            | +1,2  |
|       | 20        | +1,2                                     | -10,3           | +3,7  | +7,6          | +1,2            | +6,0  |
|       | 60        | +14,5                                    | -7,6            | +8,2  | +15,1         | +12,5           | +4,4  |
|       | 100       | +15,3                                    | -23,2           | +9,7  | +17,4         | +17,5           | +2,0  |
| 60    | 20        | +1,2                                     | +13,0           | +3,6  | +6,2          | +10,2           | +3,2  |
|       | 100       | +5,5                                     | +3,2            | +11,2 | +16,3         | +10,8           | +9,2  |
| 100   | 20        | +6,5                                     | +9,6            | +15,2 | -0,1          | +35,5           | -13,7 |
|       | 100       | +19,9                                    | +11,6           | +25,1 | -3,1          | +33,9           | -33,7 |

Таблица 10

Отношение предельных напряжений при одноосном растяжении  $\sigma_{ит}$  и сжатии  $\sigma_{uc}$  композитов,  $\chi = \sigma_{ит} / \sigma_{uc}$ 

| V, мм/мин | Состояние композита | K-211-2 |       | K-18-36 |       |
|-----------|---------------------|---------|-------|---------|-------|
|           |                     | 20 °C   | 60 °C | 20 °C   | 60 °C |
| 2         | II                  | 0,24    | -     | 0,20    | -     |
|           | III                 | 0,20    | 0,33  | 0,20    | 0,24  |
| 20        | II                  | 0,22    | -     | 0,23    | -     |
|           | III                 | 0,23    | 0,37  | 0,29    | 0,24  |
| 100       | II                  | 0,17    | -     | 0,19    | -     |
|           | III                 | 0,14    | -     | 0,17    | -     |

Таблица 11

Экспериментальные данные длительной прочности композитов

| № п/п | K-18-36        |            | K-211-2        |            |
|-------|----------------|------------|----------------|------------|
|       | $\sigma$ , МПа | $\lg \tau$ | $\sigma$ , МПа | $\lg \tau$ |
| 1     | 145,1          | 2,15       | 203,6          | 1,74       |
| 2     | 141,2          | 2,31       | 195,9          | 1,91       |
| 3     | 134,0          | 3,24       | 195,9          | 3,28       |
| 4     | 112,6          | 6,55       | 187,5          | 3,14       |
| 5     | 112,6          | 6,63       | 170,2          | 4,02       |
| 6     | 112,6          | 6,24       | 170,2          | 4,83       |
| 7     | 140,1          | 2,26       | 170,2          | 5,95       |
| 8     | 140,1          | 2,38       | 170,2          | 6,20       |
| 9     | 127,3          | 3,99       | 187,5          | 4,81       |
| 10    | 127,3          | 4,21       | 195,9          | 2,80       |
| 11    | 127,3          | 4,39       | 155,5          | 7,18       |

Вне зависимости от скорости деформирования при сжатии от 2 до 100 мм/мин повышение температуры испытаний композита K-211-2 от 20 до 60 °C и затем до 100 °C приводит к снижению предела прочности в среднем на 16 % и на 41 %, а композита K-18-36 – на 26 % и на 47 % соответственно. Модуль упругости композитов при температуре 60° C повышался в среднем на 14 % и на 23 %, а при температуре 100 °C снижался относительно результатов при температуре 20 °C на 7 % и на 14 %. Отмечено снижение предельных деформаций в опытах при 60 °C и повышение их в опытах при 100 °C.

При температуре опытов 40 °C и скорости деформирования 2 мм/мин предел прочности при сжатии композита K-211-2 составил 207,8 МПа, а композита K-18-36 – 136,5 МПа, что соответствует снижению на 6,8 % и на 13,4 % относительно значений предела прочности, полученного в опытах при 20 °C.

Скорость деформирования от 0,4 до 20 мм/мин при сжатии образцов композитов, подвергнутых есте-

ственному старению 48 лет, и температуре испытаний 20 °C влияет на исследованные механические характеристики незначительно. Имеется различие в сопротивлении деформированию композитов K-211-2 и K-18-36 со скоростями деформирования 20 мм/мин и 100 мм/мин при температуре 100 °C.

Определены значения параметра  $\chi$  критерия Писаренко – Лебедева (табл. 10):

$$\sigma_0 = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1,$$

что позволяет получить предельные кривые прочности композитов при нагружении в условиях плоского напряженного состояния [4].

Результаты исследования длительной прочности композитов K-211-2 и K-18-36 при статической сжимающей нагрузке, величина которой в ходе опыта поддерживалась постоянной, представлены в таблице 11 и аппроксимированы корреляционным уравнением  $\sigma = A - B \lg \tau$ . Значения параметров кривых дли-

тельной прочности приведены в таблице 12, где также даны прогнозируемые значения параметров  $A$  и  $B$  применительно к повышенным температурам 40 °С и 60 °С. Естественное старение образцов от 18–19 до 48 лет сказалось на длительной прочности при сжатии композитов К-211-2 и К-18-36 незначительно.

На следующем этапе испытаний образцы композитов К-211-2 и К-18-36 нагружались постоянной нагрузкой (соответствующее напряжение  $\sigma_{II}$ ) в течение 2, 3 и 4 часов ( $\lg \tau = 3,86 \div 4,16$ ,  $\tau$  в сек.), а затем производилась догрузка образцов до разрушения со скоростью деформирования 2 мм/мин. Значения разрушающих напряжений  $\sigma_{PP}$  представлены в таблице 13. Также приведены значения напряжений  $\sigma_d$ , определенные по уравнениям длительной прочности (табл. 12), отвечающим 50 % вероятности разрушения, при  $\lg \tau = 4$ .

Напряжения разрушения в процессе догрузки  $\sigma_{PP}$  при нормальной температуре (20 °С) несколько превышают кратковременную прочность  $\sigma_{НС}$ . При повышенных температурах отмечается снижение прочности К-211-2 на 13 %, а композита К-18-36 лишь на 4 %. Предельные напряжения  $\sigma_{PP}$  примерно на 25 % выше напряжений, определенных по кривой длительной прочности (50 % вероятность разрушения).

В таблице 14 приведены результаты испытаний образцов диаметром 12 мм и высотой 21 мм композита К-211-2 при сжатии со скоростью деформирования 2 мм/мин при температуре 20 °С после длительного естественного старения образцов в течение 18 лет. Образцы нагружались до заданного значения напряжений  $\sigma_{II}$  в течение определенного времени ( $\lg \tau_{II}$ ) и затем догружались до разрушения  $\sigma_{PP}$ . Опытные данные [1] по длительной прочности при сжатии образцов аппроксимированы корреляционным уравнением  $\sigma = 197,85 - 8,496 \lg \tau$  ( $\tau$  в сек.). 50 % вероятности разрушения.

Предельные напряжения  $\sigma_{PP}$  композита К-211-2 при деформировании со скоростью деформирования 2 мм/мин после предварительного длительного ( $\lg \tau_{II}$ ) нагружения ( $\sigma_{II}$ ) в двух опытах превысили значения предела прочности при той же скорости деформирования. Более значительная разница получена между предельными напряжениями  $\sigma_{PP}$  и напряжениями, определенными по кривой длительной прочности, отвечающей 50 % вероятности разрушения, а именно 9 %, 18 % и 22 %.

Изменение (снижение) кратковременной прочности не может быть использовано в качестве достоверного параметра оценки поврежденности композитов К-211-2 и К-18-36 на полимерной основе.

Таблица 12

Параметры корреляционных уравнений длительной прочности композитов

| Материал | T, °C | Состояние материала | A, МПа | B, МПа |
|----------|-------|---------------------|--------|--------|
| К-211-2  | 20    | II                  | 224,30 | 9,454  |
|          |       | III                 | 221,92 | 9,561  |
|          | 40    | II                  | 206,83 | 9,561  |
|          | 60    | III                 | 191,30 | 9,561  |
| К-18-36  | 20    | II                  | 144,38 | 5,890  |
|          |       | III                 | 157,62 | 7,087  |
|          | 40    | II                  | 136,50 | 7,087  |
|          | 60    | III                 | 116,16 | 7,087  |

Таблица 13

Сопоставление предельных напряжений композитов при разных испытаниях

| T, °C | Кол-во образ. | К-211-2             |                     |                     |                  | К-18-36             |                     |                     |                  |
|-------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|       |               | $\sigma_{II}$ , МПа | $\sigma_{PP}$ , МПа | $\sigma_{НС}$ , МПа | $\sigma_d$ , МПа | $\sigma_{II}$ , МПа | $\sigma_{PP}$ , МПа | $\sigma_{НС}$ , МПа | $\sigma_d$ , МПа |
| 20    | 5             | 91,2                | 229,9               | 223,1               | 183,7            | 72,8                | 158,3               | 156,7               | 129,3            |
| 40    | 3             | 62,3                | 181,7               | 207,8               | 168,5            | 52,1                | 136,4               | 136,5               | 108,2            |
| 60    | 3             | 63,1                | 166,1               | 192,4               | 153,0            | 50,6                | 111,9               | 116,3               | 87,2             |

Таблица 14

Сопоставление предельных напряжений композитов К-211-2 при разных испытаниях

| № опыта | $\sigma_{II}$ , МПа | $\lg \tau_{II}$ | $\sigma_{PP}$ , МПа | $\sigma_{НС}$ , МПа | $\sigma_d$ , МПа |
|---------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 1       | 124,0               | 4,14            | 177,5               | 194,6               | 162,7            |
| 2       | 119,0               | 4,18            | 198,5               | 194,6               | 162,3            |
| 3       | 168,0               | 3,28            | 204,2               | 194,6               | 167,0            |

## Выводы

1. Механические характеристики композиционных материалов на полимерной основе с дисперсными наполнителями К-211-2 и К-18-36 в результате многолетнего старения (до 48 лет) существенно зависят от температуры испытаний и скорости деформирования.

2. Особенности влияния длительного естественного старения на механические характеристики композитов К-211-2 и К-18-36 объясняется свойствами дисперсного наполнителя в матрице.

3. Изменение предела прочности при растяжении в результате многолетнего старения достигают увеличения на 6 % и уменьшения на 26 %, модуля упругости – на 33 % и на 17 %, предельных деформаций – на 90 % и на 17 % соответственно. Однако более длительное старение до 47 лет по сравнению с временем воздействия 18 лет влияет на механические характеристики менее значительно, но значительно зависит от температуры испытаний и скорости деформирования.

4. Предел прочности образцов композита К-211-2 при сжатии со скоростями деформирования от 0,05 до 100 мм/мин в результате дополнительного времени естественного старения от 18 до 48 лет увеличивался в среднем на 12 %, предельные деформации повышались в среднем на 51 %, а модуль упругости уменьшался в среднем на 18 %. Для композита К-18-36 эти механические характеристики изменялись в среднем на 4 %, 26 % и 20 % соответственно.

5. Вне зависимости от скорости деформирования при сжатии от 2 до 100 мм/мин повышение температуры испытаний композита К-211-2 от 20 до 60° С и затем до 100 °С приводит к снижению предела прочности в среднем на 16 % и на 41 %, а композита К-18-36 – на 26 % и на 47 % соответственно. Модуль упругости композитов при температуре 60 °С повысился в среднем на 14 % и на 23 %, а при температуре 100 °С снизился относительно результатов при температуре 20 °С на 7 % и на 14 %.

6. Скорость деформирования в диапазоне 0,4–20 мм/мин при сжатии состаренных образцов композитов и температуре 20 °С влияет на исследование механических характеристик незначительно.

7. Изменение параметров кривых длительной прочности композитов К-211-2 и К-18-36 при сжатии в результате естественного старения образцов от 18–19 до 48 лет незначительно.

8. Изменение (снижение) кратковременной прочности при догрузке образцов композитов К-211-2 и К-18-36 после предварительного длительного нагружения не может быть использовано в качестве достоверного параметра оценки поврежденности. Это заключение было сделано ранее на основе результатов испытаний образцов композита ВЛ на фенолформальдегидной основе с армированием асбестовыми волокнами [4].

## Литература

1. Павлов, П. А. Длительное сопротивление полимерных и композитных материалов с учетом времени многолетнего старения. Сопротивление деформированию и разрушению композитных материалов с дисперсным армированием / П. А. Павлов, Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1994. – № 6. – С. 771–780.

2. Огородов, Л. И. Результаты исследования сопротивления деформированию и разрушению ряда полимерных композитных материалов / Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1994. – № 6. – С. 771–780.

3. Failure of Structural Elements Made of Polymer Supported Composite Materials During the Multiyear Natural Aging / Blinkov P., Ogorodov L., Grabovyy P. – doi.org/10.1051/e3s/conf/20183301001 // E3S Web of Conferences 33,01001 (2018).

4. Павлов, П. А. Процесс повреждений и разрушение стохастически армированных полимерных композитов. I. Анализ моделей и экспериментальных данных при нестационарном пропорциональном нагружении / П. А. Павлов, Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1993. – № 6. – С. 755–764.

5. Огородов, Л. И. Механические характеристики полиэтилена низкой плотности при растяжении после многолетнего естественного старения / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 3 (13). – С. 44–46.

*L.I. Ogorodov<sup>1</sup>, V.A. Shapkina<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,*

*<sup>2</sup>Vologda State University*

## MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER-BASED COMPOSITE AFTER LONG-TERM NATURAL AGING

Mechanical characteristics under stretching and compression of two composite materials based on phenol-formaldehyde resin with dispersed reinforcement with wood flour and kaolin after many years (up to 48 years) natural aging of samples are presented. The test results are compared with the data of similar experiments on samples of composites in the state of delivery and after 18–19 years aging.

Composite, polymer base, dispersed fillers, long-term aging, mechanical characteristics, tension, compression.