

Supplementary material

На Рис. 1S представлена схема однонаправленного композита с модифицированной матрицей.

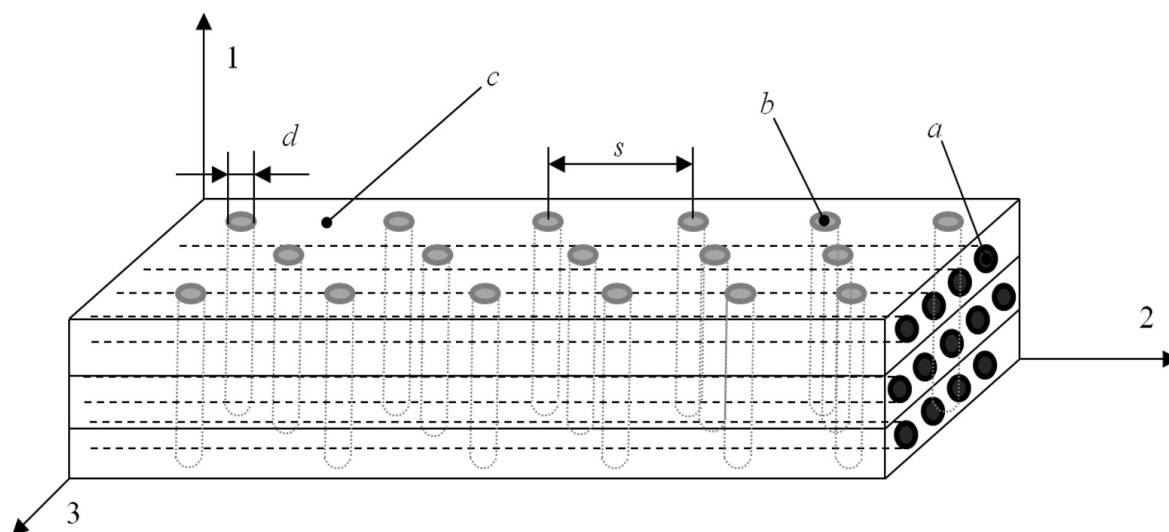


Рис. 1S. Схема однонаправленного композита: волокна в направлении 2 (основное направление) (a); матрица (b); волокна, пронизывающие однонаправленный композит в направлении 1 (прошивка) (c).

Fig. 1S. Unidirectional composite layout: fibers in direction 2 (main direction) (a); matrix (b); fibers penetrating the unidirectional composite in direction 1 (piercing) (c).

В Табл. 1S представлены механические характеристики углеродных волокон, фталонитрильного связующего и прошивочной нити.

Табл. 1S. Механические характеристики компонентов композита.

Table 1S. Mechanical characteristics of the composite components.

Армирующие волокна УОЛ-300Р / Reinforcing fibers UOL-300R								
E_{f1} , ГПа / GPa	E_{f2} , ГПа / GPa	ν_{f12}	G_{f12} , ГПа / GPa	ρ_f , г/см ³ / g/cm ³	α_{f1} , 1/°C×10 ⁻⁶	α_{f2} , 1/°C×10 ⁻⁶	$\bar{\sigma}_{f1}^+$, МПа / MPa	
210	8	0.15	12	1.7	-0.7	4.5	2750	
Связующее PN-3M / Matrix PN-3M								
E_m , ГПа / GPa	ν_m	G_m , ГПа / GPa	ρ_m , г/см ³ / g/cm ³	α_m , 1/°C×10 ⁻⁶	$\bar{\sigma}_m^+$, МПа / MPa	$\bar{\sigma}_m^-$, МПа / MPa	$\bar{\tau}_m$, МПа / MPa	
4.8	0.34	1.8	1.34	90	60	190	30	
Прошивочная нить УКН-М-3К / Piercing thread UKN-M-3K								
E_{t1} , ГПа / GPa	E_{t2} , ГПа / GPa	ν_{t12}	G_{t12} , ГПа / GPa	ρ_f , г/см ³ / g/cm ³	$\rho_{t.lin}$, текс / tex	α_{t1} , 1/°C×10 ⁻⁶	α_{t2} , 1/°C×10 ⁻⁶	$\bar{\sigma}_{t1}^+$, МПа / MPa
225	8	0.15	12	1.75	190	-0.7	4.5	3500

В Табл. 2S представлены механико-геометрические параметры прошивочной нити.

Табл. 2S. Механико-геометрические параметры прошивочной нити.

Table 2S. Mechanical and geometric parameters of the piercing thread.

Шаг прошивки S , мм / Piercing step S , mm	Схема прошивки / Piercing scheme	Эффективная рабочая площадь поперечного сечения нити A_{fib} , мм ² / Thread effective cross-section area A_{fib} , mm ²	Условный диаметр нити d_{fib} , мм Thread nominal diameter d_{fib} , mm	Коэффициент армирования прошивоч- ной нитью ψ_t Piercing thread volume fraction ψ_t
5	Шахматная Chess	0.109	0.37	0.0087

На рис. 2S представлена конечно-элементная модель модифицированной матрицы.

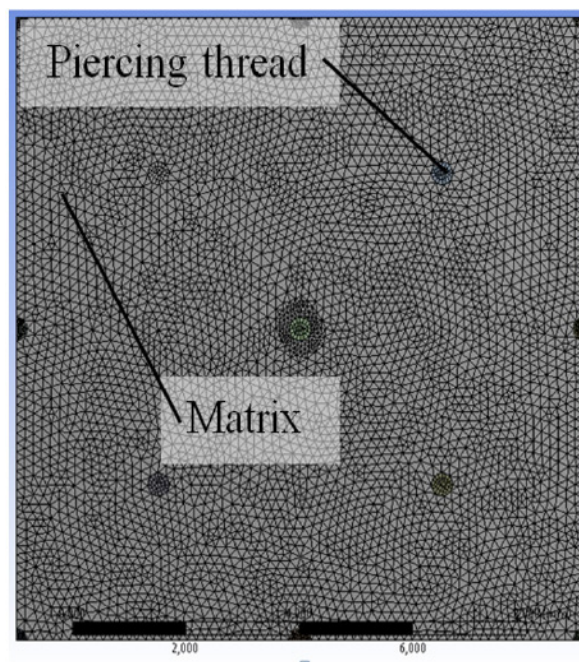


Рис. 2S. Конечно-элементная модель «модифицированной» матрицы.

Fig. 2S. A finite element model of a “modified” matrix.

1S. Компоненты тензора податливости модифицированной матрицы

Для композита, показанного на Рис. 1S, компоненты тензора податливости модифицированной матрицы имеют вид [1, 2]:

$$a_{1111} = \frac{1}{E_1} = \frac{1}{E_a \mu + E_c (1 - \mu)} = \frac{1}{[1 + (n - 1) \mu] E_c}, \quad (1S)$$

$$a_{2222} = \frac{1}{E_2} = \frac{[\mu + n(1 - \mu)][1 + (n - 1) \mu] - (n v_c - v_a)^2 \mu (1 - \mu)}{[1 + (n - 1) \mu] E_a}, \quad (2S)$$

$$a_{3333} = a_{2222}, \quad (3S)$$

$$a_{1122} = \frac{-v_c (1 - \mu) + v_a \mu}{[1 + (n - 1) \mu] E_c}, \quad (4S)$$

$$a_{1133} = a_{1122}, \quad (5S)$$

$$a_{3322} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{[\nu_a \mu + n \nu_c (1 - \mu)] [1 + (n - 1) \mu] + (n \nu_c - \nu_a)^2 \mu (1 - \mu)}{[1 + (n - 1) \mu] E_a}, \quad (6S)$$

$$a_{1212} = \frac{1}{4G_{12}} = \frac{(1 + \nu_c) [n(1 + \nu_c)(1 - \mu) + (1 + \nu_a)(1 + \mu)]}{2 [n(1 + \nu_c)(1 + \mu) + (1 + \nu_a)(1 - \mu)] E_c}, \quad (7S)$$

$$a_{1313} = a_{1212}, \quad (8S)$$

$$a_{2323} = \frac{1}{4G_{23}} = \frac{(1 + \nu_a) \mu + n(1 + \nu_c)(1 - \mu)}{2E_a}. \quad (9S)$$

здесь индекс «a» обозначает арматуру, индекс «c» – связующее, μ — коэффициент армирования модифицированной матрицы, $n = \frac{E_a}{E_c}$, модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига.

Компоненты тензора податливости однонаправленного композита на основе модифицированной матрицы

Компоненты тензора податливости однонаправленного композита на основе модифицированной матрицы имеют вид [1, 2]:

$$a_{2222} = \frac{1}{E_2} = \frac{a'_{2222}}{1 + (n'_2 - 1) \mu_2}, \quad (10S)$$

где $\frac{E_a}{E_2} = n'_2$, $a'_{2222} = \frac{1}{E_2}$, здесь верхними индексом «'» обозначены параметры модифицированной матрицы, μ_2 — коэффициент армирования в направлении 2 однонаправленного композита с модифицированной матрицей.

$$a_{1111} = \frac{1}{E_1} = \frac{a''_{1111}}{1 + (n''_1 - 1) \mu_1}, \quad (11S)$$

где $n''_1 = \frac{E_a}{E_1} = E_a a''_{1111}$, a''_{1111} определяется по формуле путем подставления в нее $\mu = \mu_2$ как для первично армированного (по направлению 2) слоя:

$$a''_{1111} = \frac{[\mu_2 + n(1 - \mu_2)] [1 + (n - 1) \mu_2] - (n \nu_c - \nu_a)^2 \mu_2 (1 - \mu_2)}{[1 + (n - 1) \mu_2] E_a}. \quad (12S)$$

$$a_{3333} = \frac{1}{E_3} = \frac{[\mu_2 + n'_2(1 - \mu_2)] [1 + (n'_2 - 1) \mu_2] - (n'_2 \nu_{c'32} + \nu_a)^2 \mu_2 (1 - \mu_2)}{[1 + (n'_2 - 1) \mu_2] E_a}, \quad (13S)$$

где

$$n'_2 = \frac{E_a}{E_2} = a'_{2222} E_a; \quad (14S)$$

$$\nu_{c'32} = \frac{[\nu_a \mu_1 + n \nu_c (1 - \mu_1)] [1 + (n - 1) \mu_1] + (n \nu_c - \nu_a)^2 \mu_1 (1 - \mu_1)}{[\mu_1 + n(1 - \mu_1)] [1 + (n - 1) \mu_1] - (n \nu_c - \nu_a)^2 \mu_1 (1 - \mu_1)}. \quad (15S)$$

$$a_{2233} = -\frac{\nu_{23}}{E_3} = \frac{(1 - \mu_2) a'_{2233} - \nu_a \mu_2 a'_{2222}}{1 + (n'_2 - 1) \mu_2}, \quad (16S)$$

где

$$a'_{2222} = \frac{1}{E_2} = \frac{[\mu_1 - n(1 - \mu_1)][1 + (n - 1)\mu_1] - (nv_c - v_a)^2 \mu_1(1 - \mu_1)}{[1 + (n - 1)\mu_1]E_a}, \quad (17S)$$

$$a'_{2233} = -\frac{v_{c'32}}{E_3} = -v_{c'32}a'_{3333}. \quad (18S)$$

$$a_{2211} = -\frac{v_{21}}{E_1} = \frac{(1 - \mu_2)a'_{2211} - v_a\mu_2a'_{2222}}{1 + (n'_2 - 1)\mu_2}. \quad (19S)$$

$$a_{1133} = \frac{(1 - \mu_1)a''_{1133} - v_a\mu_1a''_{1111}}{1 + (n''_1 - 1)\mu_1}. \quad (20S)$$

где

$$n''_1 = E_a a''_{1111}, \quad (21S)$$

$$a''_{1111} = \frac{[\mu_2 + n(1 - \mu_2)][1 + (n - 1)\mu_2] - (nv_c - v_a)^2 \mu_2(1 - \mu_2)}{[1 + (n - 1)\mu_2]E_a}. \quad (22S)$$

$$a''_{3322} = \frac{[v_a\mu_2 + nv_c(1 - \mu_2)][1 + (n - 1)\mu_2] + (nv_c - v_a)^2 \mu(1 - \mu_2)}{[1 + (n - 1)\mu_2]E_a}. \quad (23S)$$

$$a_{1212} = \frac{1}{4G_{12}} = \frac{m'_{12}(1 - \mu_2) + (1 + \mu_2)}{m'_{12}(1 + \mu_2) + (1 - \mu_2)}a'_{1212}. \quad (24S)$$

где $m'_{12} = \frac{G_a}{G'_{12}}$, а $G'_{12} = \frac{1}{4a'_{1212}}$, следовательно $a'_{1212} = \frac{1}{4G'_{12}}$

$$a_{3232} = \frac{1}{4G_{32}} = \frac{m'_{32}(1 - \mu_2) + (1 + \mu_2)}{m'_{32}(1 + \mu_2) + (1 - \mu_2)}a'_{3232}, \quad (25S)$$

где $m'_{32} = \frac{G_a}{G'_{32}}$, $G'_{32} = \frac{1}{4a'_{3232}}$, а

$$a'_{3232} = \frac{(1 + v_a)\mu + n(1 + v_c)(1 - \mu)}{2E_a}. \quad (26S)$$

$$a_{3131} = \frac{1}{4G_{31}} = \frac{m''_{31}(1 - \mu_1) + (1 + \mu_1)}{m''_{31}(1 + \mu_1) + (1 - \mu_1)}a''_{3131}, \quad (27S)$$

где $m''_{31} = \frac{G_a}{G''_{31}}$, $G''_{31} = \frac{1}{4a''_{3131}}$, а

$$a_{3131}'' = \frac{(1 + \nu_a)\mu_2 + n(1 + \nu_c)(1 - \mu_2)}{2E_a}. \quad (28S)$$

2S. Сводка результатов

Таким образом, рекомендуемые зависимости для определения компонент тензора податливости однонаправленного композита с модифицированной матрицей представлены далее:

$$a_{1111}'' = \frac{a_{1111}''}{1 + (n_1'' - 1)\mu_1}, \quad (29S)$$

$$a_{2222}' = \frac{a_{2222}'}{1 + (n_2' - 1)\mu_2}, \quad (30S)$$

$$a_{3333} = \frac{[\mu_2 + n_2'(1 - \mu_2)][1 + (n_2' - 1)\mu_2] - (a_{2233}'E_a + \nu_a)^2\mu_2(1 - \mu_2)}{[1 + (n_2' - 1)\mu_2]E_a}, \quad (31S)$$

$$a_{2211} = \frac{(1 - \mu_2)a_{2211}' - \nu_a\mu_2a_{2222}'}{1 + (n_2' - 1)\mu_2}. \quad (32S)$$

$$a_{2233} = \frac{(1 - \mu_2)a_{2233}' - \nu_a\mu_2a_{2222}'}{1 + (n_2' - 1)\mu_2}, \quad (33S)$$

$$a_{1133} = \frac{(1 - \mu_1)a_{1133}'' - \nu_a\mu_1a_{1111}''}{1 + (n_1'' - 1)\mu_1}. \quad (34S)$$

$$a_{1212} = \frac{m_{12}'(1 - \mu_2) + (1 + \mu_2)}{m_{12}'(1 + \mu_2) + (1 - \mu_2)} a_{1212}'. \quad (35S)$$

$$a_{3232} = \frac{m_{32}'(1 - \mu_2) + (1 + \mu_2)}{m_{32}'(1 + \mu_2) + (1 - \mu_2)} a_{3232}', \quad (36S)$$

$$a_{3131} = \frac{m_{31}''(1 - \mu_1) + (1 + \mu_1)}{m_{31}''(1 + \mu_1) + (1 - \mu_1)} a_{3131}''. \quad (37S)$$

3S. Аспекты конечно-элементного моделирования модифицированной матрицы

На Рис. 3S представлена общая картина напряженно-деформированного состояния «модифицированной» матрицы с прошивкой при продольном растяжении, наглядно иллюстрирующая концентрацию напряжений вблизи волокон.

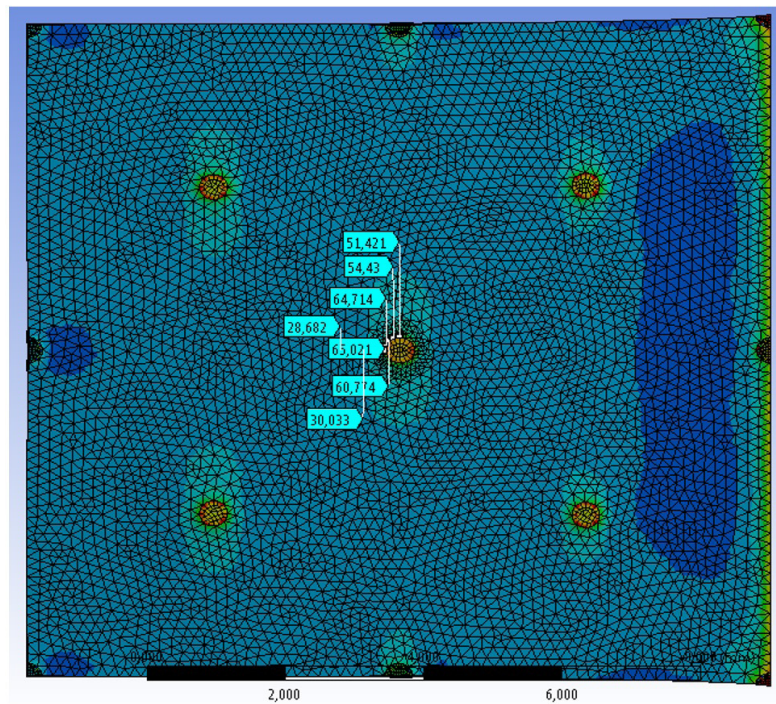


Рис. 3S. Общий вид напряженно-деформированного состояния «модифицированной» матрицы с прошивкой.

Fig. 3S. Stress-strain state general view of the «modified» matrix with piercing.

4S. Экспериментальное определение упругих свойств однонаправленного композита с прошивкой

На рис. 4S представлены форма образца с надрезами для определения предела прочности при межслойном сдвиге.

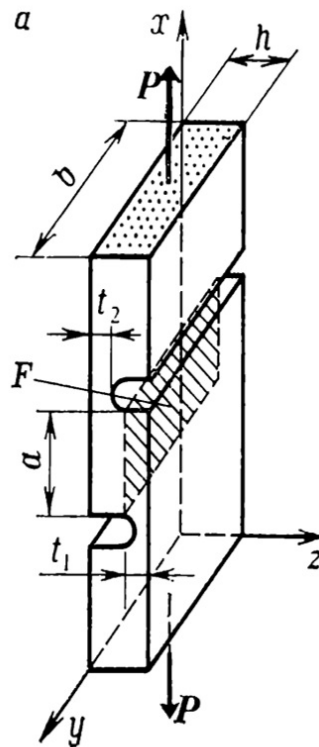


Рис. 4S. Форма образца с надрезами для определения предела прочности при межслойном сдвиге.

Fig. 4S. Specimen shape with notches to determine the interlayer shear strength.

Результаты испытаний образцов с наличием прошивки и без представлены в Табл. 3S.

Табл. 3S. Экспериментально определенные упругие и прочностные характеристики однонаправленного композита с поперечной прошивкой.

Table 3S. Experimentally determined elastic and strength characteristics of a unidirectional composite with transverse piercing.

№	Характеристика материала / Material characteristic	Единицы измерения / Units	С прошивкой / With piercing	Без прошивки / Without piercing
1	Продольный модуль упругости (в направлении основного армирования) / Longitudinal modulus of elasticity (in the direction of the main reinforcement)	ГПа / GPa	93.0	125.4
2	Поперечный модуль упругости / Transversal modulus of elasticity	ГПа / GPa	9.1	6.9
3	Предел прочности при продольном растяжении / Longitudinal tensile strength	МПа / MPa	813	1244
4	Предел прочности при поперечном растяжении / Transversal tensile strength	МПа / MPa	5.1	15.5
5	Модуль упругости при изгибе / Flexural modulus	ГПа / GPa	52.4	109.6
6	Предел прочности при трехточечном изгибе / Strength at three-point bending	МПа / MPa	438	1179
7	Модуль межслойного сдвига / Interlayer shear modulus	ГПа / GPa	1.55	1.39
8	Прочность при межслойном сдвиге / Interlayer shear strength	МПа / MPa	13.8	15.3