

УДК 677.026.442.2

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ВОЛОКОН ПРИ ЗАМЕРЗАНИИ ВОДЫ
В ПОРАХ ГЕОТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА**

М. Ю. ТРЕЩАЛИН

(Московская государственная текстильная академия им. А. Н. Косыгина)

Текстильные материалы широко применяются при строительстве автодорог. Геотекстильное полотно в теле дорожной насыпи выполняет в основном роль дренажной прослойки, обеспечивающей отвод грунтовых и дождевых вод, то есть постоянно находится во влагонасыщенном состоянии.

В холодный период года фазовое состояние воды при замерзании изменяется, что изменяет ее теплофизические и механические свойства и приводит к существенному увеличению объема. Если процесс фазового перехода происходит в порах текстильного материала, то можно предположить возникновение дополнительных напряжений в волокнах, что в свою очередь обуславливает изменение физико-механических свойств материала.

Нами определяются напряжения, возникающие в волокне вследствие его деформации по причине образования льда в околволокнистом пространстве в результате значительного изменения объема воды при фазовом переходе и различия коэффициентов теплового расширения воды и волокна.

Многочисленные исследования строения и физико-механических свойств льда [1, 2] свидетельствуют о том, что наибольшие напряжения возникают в материале при температурах $0 \dots (-10)^\circ\text{C}$. В связи с этим последующий анализ напряженно-деформированного состояния волокнистой среды целесообразно вести в этом температурном диапазоне, что позволит оценить возможность использования тех или иных видов волокон при изготовлении геотекстильных материалов.

Достаточно высокая эластичность позволяет пренебречь сжимаемостью волокон по длине, так как в результате действия нагрузки (в данном случае замерзания воды) единичное волокно может иметь большую или меньшую извитость.

Целесообразно рассмотреть совместные деформации композиционного материала на модели среды, состоящей из отдельных волокон, образующих ортогональную сетку по главным осям, и замерзшей воды. При этом полагается, что волокна непосредственно друг с другом не взаимодействуют.

Возникающие напряжения рассчитываются при следующих условиях и допущениях: волокна рассматриваются как ортотропная среда, а замерзшая вода — как изотропная; волокна имеют одинаковый диаметр; напряженно-деформированное состояние произвольного макрообъема композиционного материала согласно принятой модели среды считается однородным в горизонтальном направлении, то есть продольное расположение волокон совпадает с направлением главных осей; термическая деформация льда пренебрежимо мала в сравнении с расширением воды вследствие фазового перехода вода — лед (коэффициент термического расширения льда в диапазоне температур $0 \dots (-10)^\circ\text{C}$ равен $(52,6 \dots 33,9) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ [3], а увеличение объема воды при замерзании составляет $9 \dots 10\%$ от первичного объема, то есть деформации, обусловленные фазовым переходом вода — лед, на два порядка превышают деформацию льда в указанном интервале температур).

Поскольку волокна (в том числе принадлежащие различным семействам) не взаимодействуют между собой (то есть при деформации волокон одного семейства деформация волокон другого семейства отсутствует), коэффициент ν Пуассона волокон можно считать равным нулю. В случае одноосного сжатия $\epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 0$.

Связь напряжений и деформаций, обусловленных термическим расширением, имеет вид [3]:

для волокнистой структуры

$$\begin{cases} \epsilon_1 = (\sigma_1/E_B) + \alpha t, \\ \epsilon_2 = \epsilon_3 = (\sigma_2/E_B) + \alpha t = 0; \end{cases}$$

для льда (при условии $\sigma_2' = \sigma_3'$)

$$\begin{cases} \varepsilon_1' = [(\sigma_1' - 2\nu'\sigma_2')/E'] + \alpha't, \\ \varepsilon_2' = \varepsilon_3' = \{[\sigma_2' - \nu'(\sigma_1' + \sigma_2')]/E'\} + A = 0, \end{cases}$$

где E_v, E' — соответственно модули упругости волокна и льда;
 α — температурный коэффициент линейного расширения волокна;

$t = t_i - t_0$ — интервал температур;

ν' — коэффициент Пуассона льда;

$A = (0,09 \dots 0,1)/3$ — линейная деформация, обусловленная фазовым переходом вода — лед.

Без учета массовых сил

$$\sigma_1 S_v + \sigma_1' S' = P_0 (S_v + S'),$$

где S_v, S' — соответственно площади волокон и льда в рассматриваемом сечении; $S_{\text{общ}} = S_v + S'$;

P_0 — некоторое осредненное давление в выбранном сечении среды.

Пренебрегая давлением, получаем условие равновесия

$$\sigma_1 S_v + \sigma_1' S' = 0$$

или

$$\sigma_1 \gamma' + \sigma_1' (1 - \gamma') = 0, \quad (1)$$

где $\gamma' = S_v/S_{\text{общ}} = S_v l/S_{\text{общ}}$ $l = V''/V_{\text{общ}}$ — доля волокон в рассматриваемой площади сечения среды.

Используя модель трехмерного ортогонального расположения волокон, полагаем, что

$$V'' = V_v/3,$$

то есть в произвольно взятом сечении всегда имеется треть общего числа волокон, находящихся в соответствующем макрообъеме среды.

Тогда

$$\gamma' = V_v/3V_{\text{общ}} = \gamma/3,$$

где $\gamma = V_v/V_{\text{общ}}$ — коэффициент объемного содержания волокон в рассматриваемом объеме.

Преобразуя (1), получаем

$$\sigma_1 = -(3 - \gamma) \sigma_1' / \gamma = \zeta \sigma_1',$$

при этом

$$\varepsilon_1 = (\zeta \sigma_1' / E) + \alpha t.$$

Выражая σ_2' через σ_1' , имеем

$$\sigma_2' (1 - \nu') = \nu' \sigma_1' - A E' = \nu' \sigma_1' / (1 - \nu') - A E' / (1 - \nu').$$

Используя $\sigma_1 = \zeta \sigma_1'$ и приравнявая ε_1 для волокна и льда, находим

$$(\zeta \sigma_1' / E) + \alpha t = (1/E') \{ \sigma_1' - 2\nu' [(\nu' / (1 - \nu')) \sigma_1' - (A E' / (1 - \nu'))] \} + A,$$

$$\sigma_1' \{ (\zeta/E) - (1/E') + [2\nu'^2/E' (1 - \nu')] \} = [2\nu' A / (1 - \nu')] + A - \alpha t.$$

Отсюда

$$\sigma_1' = \{ [2\nu'A/(1-\nu')] + A - \alpha t \} / \{ -[(3-\gamma)/\gamma E] - (1/E') + [2\nu'^2/E'(1-\nu')] \}, \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \{ -[(3-\gamma)/\gamma] \{ [2\nu'A/(1-\nu')] + A - \alpha t \} \} / \{ -[(3-\gamma)/\gamma E] - (1/E') + [2\nu'^2/E'(1-\nu')] \}. \quad (3)$$

Эти зависимости позволяют определить напряжения, возникающие в замерзшей воде (σ_1') и волокнах (σ_1) для $P=0$. Однако целесообразно проанализировать вариант $P_0=P \neq 0$, способствующий получению более достоверных результатов расчета σ_1 и σ_1' , когда материал располагается в теле дорожной насыпи.

Если $P_0=P$, то $\sigma_1\gamma' + \sigma_1'(1-\gamma') = P$,

откуда

$$\sigma_1 = (P/\gamma') - [\sigma_1'(1-\gamma')/\gamma'] = \Psi P + \zeta \sigma_1',$$

где $\Psi = 1/\gamma'$.

По аналогии с предыдущим случаем

$$[(\Psi P + \zeta \sigma_1')/E] + \alpha t = E'^{-1} \{ \{ \sigma_1' - 2\nu' \{ [\nu' \sigma_1' / (1-\nu')] - [AE' / (1-\nu')] \} \} + A;$$

$$\sigma_1' \{ (\zeta/E) - (1/E') + 2\nu'^2 / [(1-\nu')E'] \} = [2\nu'A / (1-\nu')] + A - \alpha t - (\Psi P/E);$$

$$\sigma_1' = \{ [2\nu'A / (1-\nu')] + A - \alpha t - (\Psi P/E) \} / \{ (\zeta/E) - (1/E') + [2\nu'^2 / (1-\nu')E'] \}; \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \{ \zeta \{ [2\nu'A / (1-\nu')] + A - \alpha t - (\Psi P/E) \} + \Psi P \} / \{ (\zeta/E) - (1/E') + [2\nu'^2 / (1-\nu')E'] \}. \quad (5)$$

Выражения для σ_2 и σ_2' одинаковы при $P=0$ и $P_0=P \neq 0$:

$$\sigma_2' = [\nu' \sigma_1' / (1-\nu')] - [AE' / (1-\nu')],$$

$$\sigma_2 = -\alpha t E.$$

В интервале температур от 0 до $(-10)^\circ\text{C}$ характеристики льда имеют значения: $E' = 4 \cdot 10^3$ МПа, $\nu' = 0,34 \dots 0,36$, с учетом которых (4) и (5) принимают вид

$$\sigma_1' = [10\alpha + 0,06884 - (\Psi P/E)] / [(\zeta/E) - 0,1557692 \cdot 10^{-9}];$$

$$\sigma_1 = \{ \zeta [10\alpha + 0,06884 - (\Psi P/E)] / [(\zeta/E) - 0,1557692 \cdot 10^{-9}] \} + \Psi P;$$

$$\sigma_2' = (0,53846 \sigma_1') - 0,203077 \cdot 10^{-9}.$$

При этом характеристики Ψ и ζ целесообразно выражать через пористость ξ материала:

$$\Psi = 1/\gamma' = 3/\gamma = 3/(V_B/V_{\text{общ}}) = 3/(1-\xi);$$

$$\zeta = -[(3-\gamma)/\gamma] = 1 - [3/(1-\xi)].$$

ВЫВОДЫ

Получены формулы для расчета напряжений, возникающих в волокнах, и их деформации в зависимости от вида волокон, и пористости материала с учетом внешних физико-механических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Витковский К. Ф.* Механические свойства льда. — М., 1960.
2. *Лавров В. В.* Деформация и прочность льда. — Л., 1969.
3. *Ляхов Г. М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. — М.: Наука, 1982.

Рекомендована кафедрой механической технологии волокнистых материалов.
Поступила 09.01.97.
