

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОКОН ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЛЬДА В ПОРАХ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ANALYSIS OF FIBER DEFORMATION DURING ICE FORMATION IN THE PORE OF GEOTEXTILE NONWOVEN MATERIALS

М.Ю. ТРЕЩАЛИН, Ю.М. ТРЕЩАЛИН

M.YU. TRESCHALIN, YU.M. TRESCHALIN

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

(Lomonosov Moscow State University)

E-mail: mtreschalin@mail.ru

В статье производится определение напряжений, возникающих в волокне, и, как следствие, деформации волокна при образовании льда в пространстве вокруг него. В результате анализа получены зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние структурных элементов, что позволит оценить возможность использования тех или иных видов волокон при изготовлении геотекстильных нетканых полотен.

The article defines the stresses that arise in the fiber and, as a result, the deformation of the fiber during the formation of ice in the space around it. As a result of the analysis, dependences were obtained that describe the stress-strain state of structural elements, which will allow us to evaluate the possibility of using certain types of fibers in the manufacture of geotextile nonwoven fabrics.

Ключевые слова: геотекстиль, нетканый материал, волокно, вода, лед, фазовый переход, макрообъем, напряжения, деформация, плотность, пористость.

Keywords: geotextile, non-woven material, fiber, water, ice, phase transition, macrovolume, stresses, deformation, density, porosity.

В настоящее время активно развивается производство высокоэффективных нетканых материалов многоцелевого назначения. Разработка новых видов таких материалов основана на рациональном выборе волокнистого состава и технологии изготовления.

Геотекстильный нетканый материал, расположенный в теле дорожной насыпи, выполняет в основном роль дренажной прослойки, обеспечивающей отвод из насыпи грунтовых и дождевых вод. В зимний период года фазовый переход воды при замерзании приводит к изменению ее теплофизических и механических свойств, а также увеличению объема. Если этот процесс

происходит в порах материала, можно предположить возникновение дополнительных напряжений в волокнах, что в свою очередь обуславливает изменение физико-механических свойств геотекстиля [1].

Целью исследования является определение напряжений, возникающих в волокне, и, как следствие, деформации волокна при образовании льда в пространстве вокруг него.

Динамика льдообразования может быть представлена следующим образом [2, 3]. Первоначально при достижении температуры 0°C на поверхности материала, находящегося в водонасыщенном состоянии,

происходит образование кристаллов льда, которые при дальнейшем уменьшении температуры срстаются в тонкую ледяную пленку. Процесс кристаллообразования наиболее интенсивно протекает в интервале температур от 0 до (-9) °С. При этом влага, заполняющая поровое пространство, увеличивает свой объем, что приводит к возникновению напряжений, в результате которых механические свойства волокон могут существенно изменяться. Необходимо отметить, что в момент фазового перехода воды в твердое состояние ее объем увеличивается на 9-10% [2].

С понижением температуры до (-10) – (-15) °С происходит рост кристаллов льда. Эти кристаллы раздвигают структурные элементы материала, а в отдельных случаях своими острыми гранями могут нанести механические повреждения волокнам.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что наибольшие напряжения возникают в материале при температурах 0 – (-10) °С, вследствие чего анализ напряженно-деформированного состояния следует провести в этом температурном диапазоне, что позволит оценить возможность использования тех или иных видов волокон при изготовлении геотекстильных нетканых полотен.

Достаточно высокая эластичность волокон позволяет пренебречь их сжимаемостью по длине, т.к. в результате приложения нагрузки (в данном случае замерзания воды) единичное волокно может иметь большую или меньшую извитость. Поэтому целесообразно рассмотреть совместные деформации нетканого материала на модели среды, состоящей из отдельных волокон, образующих ортогональную сетку по главным осям, и замерзшей воды. При этом предполагается, что волокна непосредственно друг с другом не взаимодействуют. Расчет возникающих напряжений производится при следующих условиях и допущениях:

- волокна имеют одинаковый диаметр и рассматриваются как ортотропная среда, а замерзшая вода – как изотропная;

- напряженно-деформированное состояние произвольного макрообъема нетканого материала в соответствии с принятой моде-

лью среды считается однородным в горизонтальном направлении, т.е. продольное расположение волокон совпадает с направлением главных осей;

- термическая деформация льда пренебрежимо мала по сравнению с расширением воды вследствие фазового перехода «вода-лед» (коэффициент термического расширения льда в диапазоне температур 0 – (-10) °С составляет $(52,6 - 33,9) \times 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$) [2]). Так как ортогонально направленные волокна равноправны по плотности расположения, свойствам, геометрическим размерам и т.п., то $E_1 = E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{21} = \nu_{23} = \nu_{31} = \nu_{32} = \nu$.

Исходя из допущения, что волокна не взаимодействуют между собой, можно считать коэффициент Пуассона волокон $\nu = 0$. В случае одноосного сжатия $\epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 0$.

Связь напряжений и деформаций, обусловленных термическим расширением, имеет вид [1]:

- 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 (предполагается, что $\sigma'_2 = \sigma'_3$)

$$\begin{cases} \epsilon'_1 = \frac{\sigma'_1 - 2\nu'\sigma'_2}{E'} + \alpha't \\ \epsilon'_2 = \epsilon'_3 = \frac{\sigma'_2 - \nu'(\sigma'_1 + \sigma'_2)}{E'} + A = 0, \end{cases}$$

где E_B, E' – соответственно модули упругости волокна и льда; α – температурный коэффициент линейного расширения волокна; $t = t_1 - t_0$ – интервал температур; ν' – коэффициент Пуассона льда; $A = (0,09 - 0,1)/3$ – деформация, обусловленная переходом воды в лед.

Без учета массовых сил

$$\sigma_1 S_B + \sigma'_1 S' = P_0(S_B + S'),$$

где S_B, S' – соответственно площади волокон и льда в рассматриваемом сечении $S_{\text{общ}} = S_B + S'$; P_0 – осредненное давление в выбранном сечении среды.

Пренебрегая давлением, получим условие равновесия:

$$\sigma_1 S_B + \sigma'_1 S' = 0,$$

или

$$[\sigma_1 S_B / (S_B + S')] + \sigma'_1 S' / (S_B + S') = 0,$$

или

$$\sigma_1 \gamma' + \sigma'_1 (1 - \gamma') = 0, \quad (1)$$

где $\gamma' = S_B / S_{\text{общ}} = \ell S_B / \ell S_{\text{общ}} = V'' / V_{\text{общ}}$ – доля волокон в рассматриваемой площади сечения среды.

Используя модель трехмерного ортогонального расположения волокон, можно предположить, что $V'' = V_B / 3$, т.е. в произвольно взятом сечении всегда имеется треть от общего числа волокон, находящихся в соответствующем макрообъеме среды.

$$\text{Тогда } \gamma' = V_B / 3 \cdot V_{\text{общ}} = \gamma / 3,$$

где $\gamma = V_B / V_{\text{общ}}$ – коэффициент объемного содержания волокон.

Преобразуя (1), получаем:

$$\sigma'_1 = \frac{-\sigma_1 \gamma'}{(1 - \gamma')} = \frac{-\sigma_1 \gamma}{[3(1 - \gamma/3)]} = -\sigma_1 \gamma / (3 - \gamma)$$

$$\text{или } \sigma_1 = -(3 - \gamma) \sigma'_1 / \gamma = \zeta \sigma'_1.$$

Тогда

$$\varepsilon_1 = (\zeta \sigma'_1 / E) + \alpha t.$$

Выражая σ'_2 через σ'_1 , получим

$$(\Psi P + \zeta \sigma'_1 / E) + \alpha t = (1/E') \{ \sigma'_1 - 2\nu' \{ [\nu' \sigma'_1 / (1 - \nu')] - [AE' / (1 - \nu')] \} \} + A;$$

$$\sigma'_1 \{ (\zeta/E) - (1/E') + 2\nu'^2 / [E'(1 - \nu')] \} = [2\nu' A / (1 - \nu')] + A - \alpha t - (\Psi P / E),$$

$$\sigma'_1 = \frac{[2 \cdot \nu' \cdot A / (1 - \nu')] + A - \alpha \cdot t - (\Psi \cdot P / E)}{(\zeta/E) - (1/E') + [2 \cdot \nu'^2 / E' \cdot (1 - \nu')]}, \quad (4)$$

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

Выражения для σ_2 и σ'_2 одинаковы как при $P = 0$, так и при $P_0 = P \neq 0$:

$$\sigma'_2 = [\nu' \sigma'_1 / (1 - \nu')] - [AE' / (1 - \nu')];$$

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

$$\sigma'_2 (1 - \nu') = \nu' \sigma'_1 - AE' =$$

$$= \nu' \sigma'_1 / (1 - \nu') - AE' / (1 - \nu').$$

Используя $\sigma_1 = \zeta \cdot \sigma'_1$ и приравнявая ε_1 для волокна и льда, получим

$$(\zeta \sigma'_1 / E) + \alpha t =$$

$$= (1/E') \left[\frac{\sigma'_1 - 2\nu' \nu' \sigma'_1}{1 - \nu'} - AE' / (1 - \nu') \right] + A.$$

Тогда

$$\sigma'_1 = \frac{[2\nu' A / (1 - \nu')] + A - \alpha t}{-[(3 - \gamma) / \gamma E] - (1/E') + [2\nu'^2 / E' (1 - \nu')]} \quad (2)$$

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

Зависимости (2) и (3) позволяют определить напряжения, возникающие в замерзшей воде σ'_1 и волокнах σ_1 для случая $P = 0$. Однако представляется целесообразным проанализировать вариант, когда $P_0 = P \neq 0$, что даст возможность получить достоверные результаты расчета σ_1 и σ'_1 .

Если $P_0 = P$, то

$$\sigma_1 S_B + \sigma'_1 S' = P(S_B + S')$$

или

$$\sigma_1 \gamma' + \sigma'_1 (1 - \gamma') = P.$$

Тогда

$$\sigma_1 = (P / \gamma') - [\sigma'_1 (1 - \gamma') / \gamma'] = \Psi P + \zeta \sigma'_1,$$

где $\Psi = 1 / \gamma'$.

По аналогии с предыдущим случаем

Характеристики льда в интервале температур от 0 до (-10) °C имеют следующие значения: $E' = 4 \times 10^3$ МПа, $\nu' = 0,34 - 0,36$ [2]. С учетом приведенных данных формулы (4) и (5) преобразуются к виду:

$$\sigma'_1 = \frac{10\alpha + 0.06884 - (\Psi P/E)}{(\zeta/E) - 0.1557692 \cdot 10^{-9}},$$

$$\sigma_1 = \Psi P + \frac{\zeta[10\alpha + 0.06884 - (\Psi P/E)]}{(\zeta/E) - 0.1557692 \cdot 10^{-9}},$$

$$\sigma'_2 = 0.53846\sigma'_1 - 0.203077 \cdot 10^{-9}.$$

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

$$\Psi = 1/\gamma' =$$

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кожевников И.Г., Новицкий Л.А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.

2. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.

3. *Киселев М.Ф.* Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1978. 176 с.

REFERENCES

1. *Kozhevnikov I.G., Novitsky L.A.* Thermophysical properties of materials at low temperatures. M.: Mashinostroenie, 1982. 328 p.

2. *Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P.* Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 384 p.

3. *Kiselev M.F.* Theory of compressibility of thawing soils under pressure. L.: Stroyizdat, Leningrad. department, 1978. 176 p.

Рекомендована организационным комитетом IV Международного научно-практического симпозиума «Технический текстиль России: нетканые материалы, сырье, реинжиниринг» Поступила 07.03.23