

ISSN 1999-4125 (Print)

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ
ENGINEERING TECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 620.22

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-28-35

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ
ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА****Федяев Владимир Леонидович¹, Галимов Энгель Рафикович²,
Беляев Алексей Витальевич², Сироткина Лилия Витальевна³**¹ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева³Казанский государственный энергетический университет

*для корреспонденции: vlfed2020@gmail.com

**Информация о статье**

Поступила:

19 ноября 2022 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 мая 2023 г.

Принята к публикации:

25 мая 2023 г.

Опубликована:

15 июня 2023 г.

Ключевые слова:

пористые технические материалы, классификация материалов, механические свойства, внешние атмосферные и эксплуатационные факторы, оценка свойств, обобщенные зависимости.

Аннотация.

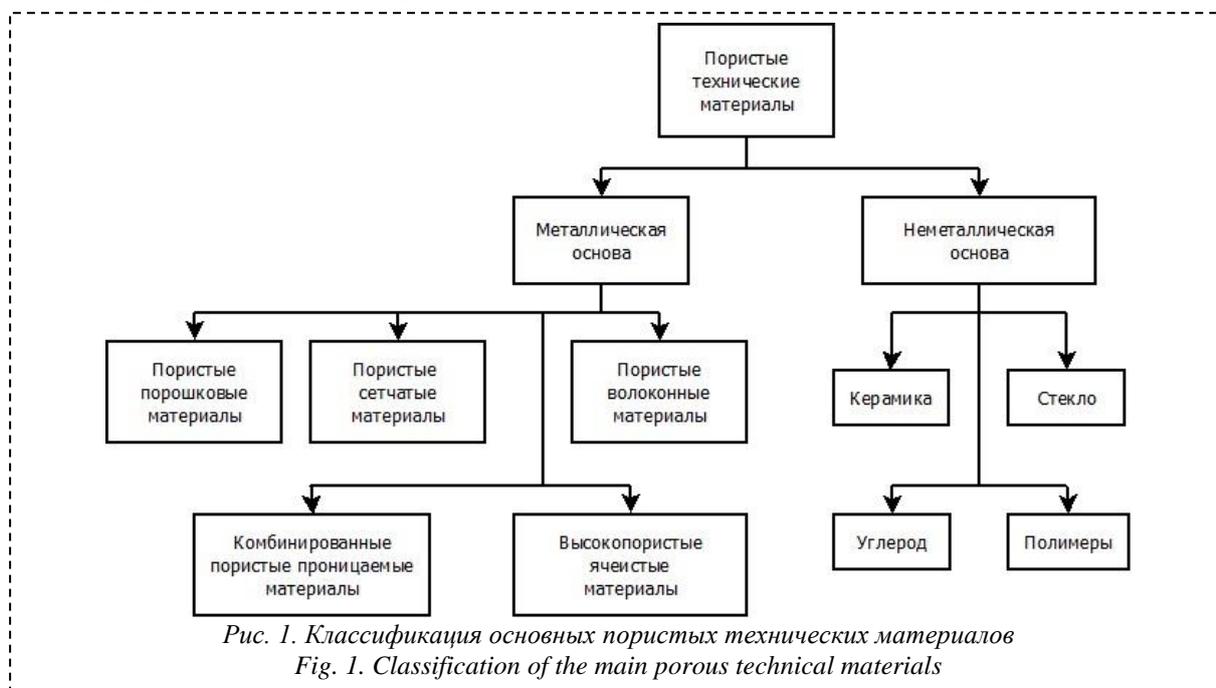
В статье рассматриваются пористые технические материалы – твердые тела, состоящие из основы (каркаса, матрицы) и совокупности полостей (пор), в которых может быть вакуум (сильно разреженный газ), находится газовая среда, парогазовая смесь, а также жидкость. Предлагается классификация этих материалов, отмечаются их специфические свойства, широкое применение во многих отраслях хозяйства. В качестве основных выделяются механические, прочностные свойства, такие как упругость, хрупкость, пластичность, предел прочности при растяжении, сжатии, усталостная прочность данных материалов. Принимается во внимание то обстоятельство, что названные свойства зависят от внутренних факторов, таких как химический состав компонент материалов, структуры их, в том числе пористости, а также от совокупности внешних факторов, которые различаются на атмосферные (интенсивность солнечного излучения, температура, влажность среды, атмосферное давление) и собственно эксплуатационные. При этом предполагается, что эти факторы влияют на механические свойства пористого материала как через пористость, так и через механические показатели материала каркаса. Выделяются два крайних случая: на эксплуатационные показатели преимущественно действуют внутренние и атмосферные факторы; доминирующими являются экстремальные внешние факторы. С использованием принципа аддитивности (суперпозиции) записываются в общем виде соотношения для оценки свойств рассматриваемых материалов, называются варианты аппроксимации соответствующих зависимостей.

Для цитирования: Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В., Сироткина Л.В. Влияние пористости технических материалов на их прочностные свойства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 28-35. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-28-35, EDN: GTJXGR

Введение. Пористые материалы широко представлены как в природе, так и технике. В природе это почва, грунты, горные породы, разнообразные растительные ткани, костные структуры и т.д. [1-3]. Искусственно созданные материалы, которые далее мы будем называть пористыми техническими материалами (ПТМ), являются основным объектом настоящего исследования. Пористый технический материал – твердое тело, состоящее из основы (каркаса, матрицы) и совокупности полостей (пор), в которых может быть вакуум (сильно разреженный газ), находится газовая среда, парогазовая смесь, содержащая в том числе механические включения (капли жидкости, твердые частицы), являющаяся газозвесью, а также жидкость, возможно с включением капель другой жидкости (эмульсия), твердых частиц (суспензия), пузырьков (пузырьковая жидкость). По сути ПТМ можно определить как композит, состоящий хотя бы из двух компонент [4-6].

При классификации ПТМ [7] выделяются следующие основные признаки: химический состав составляющих компонент, происхождение пористости, структура каркаса, размерно-геометрические показатели. Соответственно, различают материалы с регулярной либо стохастической пористостью, при этом поры могут быть открытыми, тупиковыми или закрытыми. Отметим также, что помимо пористости как таковой, структуру материала характеризуют размеры и распределение пор в контрольном объеме, извилистость, удельная поверхность их, другие показатели. Один из вариантов классификации пористых технических материалов приводится на Рис. 1.

В силу большого разнообразия рассматриваемых материалов они в целом обладают рядом специфических свойств: малый удельный вес, теплопроводность, звукопроводность; высокая проницаемость, в том числе диффузионная, адсорбция (благодаря развитой поверхности контакта сред). В общем случае можно выделить следующие физико-химические свойства ПТМ, из которых основными являются механические свойства (упругость, хрупкость, пластичность, твердость, предел прочности, усталостная прочность); теплофизические свойства (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, теплостойкость, термостойкость, жаростойкость, морозостойкость); электрические свойства (электропроводность); стойкость к воздействию радиационного, электромагнитного, других видов излучений; стойкость по отношению к химически агрессивным веществам; водостойкость, влагостойкость; стойкость в сильно разреженных газовых средах, вакууме.



Например, пористые полимерные материалы благодаря малому удельному весу, способности превращаться под воздействием высоких температур в прочные углепластиковые структуры успешно применяются при изготовлении объектов космической техники. Они находят все большее применение в автомобилестроении в качестве звуко- и теплоизолирующих

материалов, в судостроении из-за высокой плавучести, способности выдерживать большие сжимающие нагрузки. Весьма обширна область использования полимерных ПТМ в строительстве, трубопроводном транспорте, химической и нефтехимической промышленности, в ядерной физике, в энергетике и коммунальном хозяйстве. Кроме того, они успешно применяются в электротехнике и электронике, в медицине в качестве имплантатных материалов, обладающих такими важными свойствами, как инертность к воздействию агрессивных сред, биологическая совместимость, проницаемость.

Теоретическая часть исследований. Очевидно, что названные свойства ПТМ зависят, во-первых, от внутренних факторов, таких как химический состав (X_i), строение и структура материала (S_i). Во-вторых, от нагрузок, действующих на каркас (матрицу) пористого материала конструкций, изделий, деталей извне, со стороны окружающей среды. Совокупность их обозначим через F_j , считая при этом, что

$$F_j = F_j(g_a, g_e), \quad (1)$$

где параметры g_a характеризуют атмосферные, а g_e – дополнительные эксплуатационные факторы.

Остановившись далее только на оценке механических свойств, описываемых вектором Y_m , положим, что

$$Y_m = Y_m(X_i, S_i, F_j). \quad (2)$$

Здесь и далее индекс « m » означает определенный показатель, описывающий механические свойства, например, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести, прочности и т.д. При условии, что строение и структура пористого материала в основном зависит от пористости m , запишем:

$$S_i = S_i(m). \quad (3)$$

С течением времени по ходу использования пористого материала пористость его будет меняться, следовательно [8]

$$m = m(g_a, g_e). \quad (4)$$

Ради определенности предположим, что к факторам g_a относятся интенсивность солнечного излучения r_a , температура t_a , влажность φ_a , параметр κ_a , характеризующий воздействие на материал химически активных газов; к факторам g_e – температура t_e , влажность φ_e , действующие на материал нормальные p_{ne} и тангенциальные (сдвиговые) $p_{\tau e}$ нагрузки. Принимая за нормирующие показатели интенсивности солнечного излучения величину r_0 , температуры t_0 , влажности φ_0 , химического воздействия κ_0 , механических нагрузок p_0 из (4) относительно безразмерных параметров $\gamma_a = \frac{r_a}{r_0}$, $\theta_a = \frac{t_a}{t_0}$, $\psi_a = \frac{\varphi_a}{\varphi_0}$, $\chi_a = \frac{\kappa_a}{\kappa_0}$, $\theta_e = \frac{t_e}{t_0}$, $\psi_e = \frac{\varphi_e}{\varphi_0}$, $\sigma_e = \frac{p_{ne}}{p_0}$, $\tau_e = \frac{p_{\tau e}}{p_0}$ получим зависимость

$$m = m(\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a; \theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e). \quad (5)$$

Подчеркнем, что данные параметры действуют на показатели Y_m как опосредованно через S_i (см. (3)), так и непосредственно, влияя на свойства каркаса (матрицы) пористого материала (функция F_i).

С целью конкретизации приведенных соотношений при математическом описании влияния выделенных факторов на пористость, механические свойства материалов воспользуемся принципом аддитивности (суперпозиции). Соответственно, выражение (5) для пористости m запишем в виде:

$$m = m_0 - m_j, \quad (6)$$

где m_0 – начальная пористость материала,

$$m_j = m_a(\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a) + m_e(\theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e). \quad (7)$$

В свою очередь функцию (2) для оценки безразмерных показателей y_m ($y_m = \frac{Y_m}{Y_{m0}}$, Y_{m0} – характерные значения величины Y_m) представим следующим образом:

$$y_m = H_m(x_i, m_0, s_{i0}) + G_m(m_j, f_j). \quad (8)$$

Здесь H_m , G_m – функции безразмерных аргументов m_0 , m_j , а также $x_i = \frac{X_i}{X_{i0}}$, s_{i0} , f_j , характеризующих, соответственно, химический состав компонент пористого материала, особенности структуры его в отсутствие внешних факторов, зависимость для F_j (1). При этом по аналогии с (7) запишем:

$$f_j = f_a(\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a) + f_e(\theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e). \quad (9)$$

Следует заметить, что наличие соотношений (6) – (9) дает возможность выделить два крайних случая. Первый, когда влияние на величину u_m эксплуатационных факторов m_e, f_e мало, доминирующими являются внутренние (H_m) и атмосферные (m_a, f_a) факторы, что может иметь место, например, при хранении конструкций, изделий, деталей. Во втором же случае, наоборот, предполагается, что конструкции, изделия, детали испытывают по отношению к атмосферным значительные нагрузки, эксплуатируются в экстремальных условиях. При этом в соотношениях (7), (9) слагаемые m_a, f_a можно исключить из рассмотрения.

В общем, что касается вида функций $H_m, G_m, m_a, m_e, f_a, f_e$, то, по нашему мнению, их можно снова, применяя принцип аддитивности, представить в виде сумм:

$$H_m = A_x \cdot x_i + A_m m_0 + A_s \cdot s_{i0}, \quad G_m = B_m \cdot m_j + B_f \cdot f_j,$$

где в функциях m_j, f_j слагаемые

$$m_a = \alpha_\gamma \cdot \gamma_a + \alpha_\theta \cdot \theta_a + \alpha_\psi \cdot \psi_a + \alpha_\chi \cdot \chi_a, \quad m_e = \beta_\theta \cdot \theta_e + \beta_\psi \cdot \psi_e + \beta_\sigma \cdot \sigma_e + \beta_\tau \cdot \tau_e;$$

$$f_a = \zeta_\gamma \cdot \gamma_a + \zeta_\theta \cdot \theta_a + \zeta_\psi \cdot \psi_a + \zeta_\chi \cdot \chi_a, \quad f_e = \eta_\theta \cdot \theta_e + \eta_\psi \cdot \psi_e + \eta_\sigma \cdot \sigma_e + \eta_\tau \cdot \tau_e.$$

Видно, что показатели u_m зависят линейно от совокупности параметров, характеризующих влияние на механические свойства пористых материалов внутренних и внешних факторов. При этом аппроксимирующие коэффициенты $A, B, \alpha, \beta, \zeta, \eta$ с соответствующими индексами можно найти с использованием результатов анализа экспериментальных, теоретических данных. Отметим также, что линейная аппроксимация проста, удобна при отыскании требуемых оценок, однако, как правило, обладает малой точностью, характеризует соответствующие зависимости лишь в среднем. Более точными являются степенные, показательные аппроксимирующие функции, широко применяемые при оценке изменений свойств материалов в случае действия на них соответствующих факторов [2-6, 9-15].

Обращаясь к названной, другой научно-технической литературе, нетрудно убедиться, что в простейшем случае, когда действие атмосферных факторов g_a не учитывается, среди эксплуатационных g_e выделяются лишь температурные t_e и сжимающие p_{ne} нагрузки; в соответствии с законом уплотнения относительно безразмерных переменных запишем:

$$m_j = m_e(\theta_e, \sigma_e) = a_c(\theta_e)\sigma_e. \quad (10)$$

Здесь a_c – коэффициент сжимаемости материала. При линейной аппроксимации его $a_c = a_c(\theta_e) = a_0 + a_1\theta_e$ (a_0, a_1 – эмпирические параметры).

Отсюда следует, что с увеличением a_0, a_1 , температуры внешней среды θ_e , сжимающих нагрузок σ_e общая пористость m (см. (6)) уменьшается.

Точно так же в выражении (9) для описания нагрузок, действующих непосредственно на каркас (матрицу) материала, положим $f_a = 0$,

$$f_j = f_e(\theta_e, \sigma_e) = f_e(\theta_s(\theta_e), \sigma_s, \sigma_e). \quad (11)$$

Запись (11) означает, что показатель f_j зависит, во-первых, от безразмерных массовых сил σ_s , действующих на каркас в дополнение к поверхностным нагрузкам σ_e . – таковыми могут быть гравитационные, центробежные, электромагнитные и другие силы; во-вторых, учитываются термонапряжения, обусловленные перепадом температуры $\theta_s = \frac{t_s}{t_0}$ в материале самого каркаса. При этом для оценки данного перепада необходимо решить соответствующую тепловую задачу. В простейшем случае можно ограничиться рассмотрением теплового баланса выделенного пористого тела.

Далее выберем в качестве показателя Y_m , характеризующего механические свойства материала, предел прочности при сжатии σ_c . Не принимая во внимание массовые силы, полагая, что характерным значением величины Y_m является предел прочности материала каркаса σ_{0c} при нормальной температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, следуя [9, 10], запишем зависимость (8) в виде:

$$y_m = \frac{Y_m}{\sigma_{0c} = H_m} (m_0) + G_m(m_j, f_j). \quad (12)$$

Здесь $H_m = 1 - m_0$, $G_m = g_c(\theta_s)(1 - \bar{m})\bar{m}^{\alpha_c}$, согласно (10) $\bar{m} = \frac{m_j}{m_0} = \frac{a_c(\theta_e)\sigma_e}{m_0}$; $g_c = g_c(\theta_s) = \gamma_c(\beta_c - k_t(1 - \theta_s))$, γ_c, β_c, k_t – эмпирические параметры; α_c – показатель степени. В частности [9], $\gamma_c = 0.9$, $\beta_c = 0.95$, $k_t = 6 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_c = 2/3$.

Результаты и обсуждение. Из (12) видно, что безразмерный предел прочности u_m пористого материала определяется двумя слагаемыми: первое из них H_m зависит от первоначальной

пористости m_0 линейно; второе, G_m , в зависимости от относительной пористости \bar{m} , обусловленной действием на материал эксплуатационных нагрузок Θ_e , σ_e , Θ_s , нелинейно. В предельных случаях, когда $\bar{m} = 1$ (внешние факторы слабо влияют на пористость m_j) или величина \bar{m} мала (материал уплотняется), соответственно, слагаемое G_m в (12) либо малая величина, либо большая. При этом эксплуатационные нагрузки приводят к увеличению предела прочности материала.

Примечательно, что с увеличением температуры Θ_s материала при неизменных прочих параметрах величина g_c , а значит, и G_m увеличивается, тогда как при уменьшении этой температуры (охлаждении материала), наоборот, G_m уменьшается.

При условии, что значение пористости m_j близко к m_0 , $\bar{m} \approx 1 - \mu$ (μ – малая величина), приблизительно

$$G_m \approx g_c(\Theta_s)(\mu - \alpha_c \mu^2 + 0.5\alpha_c(\alpha_c - 1)\mu^3). \quad (13)$$

Из (13) следует, что при $\mu \approx \frac{0.5}{\alpha_c}$ функция $G_m = G_m(\mu)$ принимает максимальное значение:

$$G \frac{0.25g_c(\Theta_s)}{\alpha_c} \max.$$

Это значит, что при внешних температурных Θ_e , механических σ_e нагрузках, определяемых соотношением

$$(a_0 + a_1\Theta_e)\sigma_e = m_0 \left(1 - \frac{0.5}{\alpha_c}\right),$$

предел прочности при сжатии пористого материала будет максимальным, данные нагрузки являются предпочтительными.

Отметим также, что представленные в работе подходы, результаты могут быть использованы при оценке ресурса пористых технических материалов, изделий из них [16-20].

Выводы. Таким образом, предложен подход для математического описания показателей основных механических, а также других свойств пористых технических материалов в зависимости как от внутренних, так и внешних факторов. Представлен пример применения данного подхода в случае, когда показатель – предел прочности пористых материалов при сжатии. Установлены режимы нагружения этих материалов, при которых предел прочности принимает максимальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М. : Наука, 1977. 664 с.
2. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. М. : Ижевск: РХД, 2001. 736 с.
3. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т. и др. Механика насыщенных пористых сред. М. : Недра, 1970. 336 с.
4. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении. М. : Машиностроение, 1981. 247 с.
5. Белов С. В. Пористые проницаемые материалы. М. : Металлургия, 1987. 335 с.
6. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. Кн.2 / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. Геллера А. Б. и др.; Под ред. Геллера Б. Э. М. : Машиностроение, 1988. 584 с.
7. Фандеев В. П., Самохина К. С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. №4. С. 1-21.
8. Гимранов И. Р., Федяев В. Л. Методологический подход к оценке влияния пористости на эксплуатационные свойства функциональных полимерных порошковых покрытий // Вестник Югорского государственного университета. 2021. № 3(62). С. 19-24.
9. Гойхман Б. Д., Смахунова Т. П. Прогнозирование изменений свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации // Успехи химии. 1980. Т. XLIX. №8. С. 1554-1573.
10. Протасов В. Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. М. : Недра, 1985. 192 с.
11. Гулгезли Алескер, Хейрабади Газала. Влияние пористости на свойства материалов. М. : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 140 с.
12. Hideo Nakajima. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores // Proceeding of the Japan academy, Series B Physical and biological science. 2010. №86(9). P. 884–899.
13. Wolla J. M., Provenzano V. Mechanical properties of gasar porous copper // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1995. №371. P. 377–382.
14. Boccaccini A. R., Ondracek G., Mombello E. Determination of stress concentration factors in porous materials // Journal of Materials Science Letters. 1995. №14. P. 534–536.
15. Lu G., Lu G.Q., Xiao Z.M. Mechanical Properties of Porous Materials // Journal of Porous Materials. 1999. №6. P. 359-368.

16. Павлов Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М. : Химия, 1982. 224 с.
17. Федяев В. Л., Галимов Э. Р., Беляев А. В. Ресурс пористых технических материалов: монография. Казань : Изд-во Академии наук РТ, 2022. 136 с.
18. Гимранов И. Р., Федяев В. Л., Галимов Э. Р. Оценка ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий // Вестник Югорского государственного университета, 2021. №3(62). С. 11-18.
19. Галимов Э. Р., Федяев В. Л., Абдуллин А. Л., Галимова Н. Я., Шарафутдинова Э. Э., Самойлов В. М., Данилов Е. А. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Коллективная монография. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2022. 324 с.
20. Пимонов А. Г., Климов В. И., Иванов В. В., Егоров П. В. Определение констант прочности и долговечности для образцов из полимерных композиционных материалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 1998. № 3(4). С. 11-14.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Федяев Владимир Леонидович, доктор техн. наук, профессор, ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, (420111, Россия, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31), e-mail: vlfed2020@gmail.com

Галимов Энгель Рафикович, доктор техн. наук, профессор, азанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, (420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), e-mail: 89871726737@mail.ru

Беляев Алексей Витальевич, кандидат техн. наук, доцент, азанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, (420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), e-mail: alexey-beljaev@mail.ru

Сироткина Лилия Витальевна, кандидат хим. наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, (420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: liliya_belyaeva@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Галимов Энгель Рафикович – общее руководство, формулировка темы и постановка задач, выбор методов их решений.

Федяев Владимир Леонидович – разработка методов оценки свойств пористых материалов, находящихся под воздействием внутренних и внешних факторов.

Беляев Алексей Витальевич – обзор научно-технической литературы и ее анализ, предложения по совершенствованию методов оценки свойств пористых технических материалов.

Сироткина Лилия Витальевна – сбор и анализ данных, обработка полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INFLUENCE OF THE POROSITY OF TECHNICAL MATERIALS ON THEIR STRENGTH PROPERTIES

Vladimir L. Fedyayev¹, Engel R. Galimov²,
Aleksey V. Belyayev², Liliya V. Sirotkina³¹IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev³Kazan State Power Engineering University

*for correspondence: vlfed2020@gmail.com

**Article info**

Received:

19 November 2022

Accepted for publication:

10 May 2023

Accepted:

25 May 2023

Published:

15 June 2023

Keywords: porous technical materials, classification of materials, mechanical properties, external atmospheric and operational factors, evaluation of properties, generalized dependencies

Abstract.

The article deals with porous technical materials – solids, consisting of a base (framework, matrix) and a set of cavities (pores), in which there can be vacuum (highly rarefied gas), a gaseous medium, a vapor-gas mixture, and also liquid. A classification of these materials is proposed, their specific properties and their wide application in many sectors of the economy are indicated. The main ones are mechanical, strength properties, such as elasticity, brittleness, plasticity, tensile strength, compression, and fatigue strength of these materials. It takes into account the fact that these properties depend on internal factors, such as the chemical composition of the components of materials, their structure, including porosity, as well as on the totality of external factors that are differentiated into atmospheric (intensity of solar radiation, temperature, humidity, atmospheric pressure) and proper operational ones. It is assumed that these factors affect the mechanical properties of the porous material through both porosity and the mechanical properties of the frame material. There are two extreme cases: performance is mainly affected by internal and atmospheric factors; extreme external factors are dominant. Using the principle of additivity (superpositions), the ratios are written in general form to assess the properties of the materials under consideration, and the variants of approximation of the corresponding dependencies are named

For citation: Fedyayev V.L., Galimov E.R., Belyayev A.V., Sirotkina L.V. Influence of the porosity of technical materials on their strength properties. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 2(156):28-35. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-28-35, EDN: GTJXGR

REFERENCES

1. Polubarinova-Kochina P.Ya. The theory of groundwater movement. M.: Nauka; 1977. 664 p.
2. Shchelkachev V.N., Lapuk B.B. Underground hydraulics. M.: Izhevsk: RHD; 2001. 736 p.
3. Nikolayevsky V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T. and other Mechanics of saturated porous media. M.: Nedra; 1970. 336 p.
4. Belov S.V. Porous metals in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie; 1981. 247 p.
5. Belov S.V. porous permeable materials. M.: Metallurgiya; 1987. 335 p.
6. Handbook of Composite Materials: in 2 books. Book 2 / Edited by Lubin J.; Translated from English by Geller A.B. and others; Edited by Geller B.E. M.: Mechanical Engineering; 1988. 584 p.
7. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Methods for the study of porous structures. *Internet journal "Science Studies"*. 2015; 7(4):1-21.
8. Gimranov I.R., Fedyayev V.L. Methodological approach to assessing the effect of porosity on the operational properties of functional polymer powder coatings. *Bulletin of the Yugorsk State University*. 2021; 3(62):19-24.
9. Goikhman B.D., Smekhunova T.P. Predicting changes in the properties of polymeric materials during long-term storage and operation. *Uspekhi khimii*. 1980; XLIX(8):1554-1573.
10. Protasov V.N. Polymer coatings in the oil industry. Moscow: Nedra; 1985. 192 p.
11. Gulgezli Alesker, Kheyrbadi Ghazalya. Influence of porosity on the properties of materials. M.: LAP Lambert

Academic Publishing; 2014. 140 p.

12 Hideo Nakajima Fabrication, properties, and applications of porous metals with di-rectional pores. *Proceeding of the Japan academy, Series B Physical and biological science*. 2010; 86(9):884-899.

13. Wolla J.M., Provenzano V. Mechanical properties of gasar porous copper. *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1995; 371:377–382.

14. Boccaccini A.R., Ondracek G., Mombello E. Determination of stress concentration factors in porous materials. *Journal of Materials Science Letters*. 1995; 14:534–536.

15. Lu G., Lu G.Q., Xiao Z.M. Mechanical Properties of Porous Materials. *Journal of Porous Materials*. 1999; 6:359-368.

16. Pavlov N.N. Aging of plastics in natural and artificial conditions. Moscow: Chemistry; 1982. 224 p.

17. Fedyaev V.L., Galimov E.R., Belyaev A.V. Resource of porous technical materials: monograph. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2022. 136 p.

18. Gimranov I.R., Fedyaev V.L., Galimov E.R. Assessment of the resource of functional polymer powder coatings. *Bulletin of the Yugorsk State University*, 2021; 3(62):11-18.

19. Galimov E.R., Fedyaev V.L., Abdullin A.L., Galimova N.Ya., Sharafutdinova E.E., Samoilov V.M., Danilov E.A. Syntactic carbon foams: preparation, structure, properties, application. Collective monograph. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2022. 324 p.

20. Pimonov A.G., Klimov V.I., Ivanov V.V., Egorov P.V. Determination of strength and durability constants for specimens made of polymer composite materials. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 1998; 3(4):11-14.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vladimir L. Fedyaev, Professor, IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS, (2/31 street Lobachevsky, Kazan, 420111, Russian Federation), e-mail: vlfed2020@gmail.com

Engel R. Galimov, Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, (10 street K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation), e-mail: 89871726737@mail.ru

Aleksey V. Belyaev, Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, (10 street K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation), e-mail: alexey-beljaev@mail.ru

Liliya V. Sirotkina, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, (51 street Krasnoselskaya, Kazan, 420066, Russian Federation), e-mail: liliya_belyaeva@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladimir L. Fedyaev – general guidance, topic formulation and problem statement, choice of methods for their solutions.

Engel R. Galimov – development of methods for assessing the properties of porous materials that are under the influence of internal and external factors.

Aleksey V. Belyaev – review of scientific and technical literature and its analysis, suggestions for improving methods for assessing the properties of porous technical materials.

Liliya V. Sirotkina – data collection and analysis, processing of the results obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

