

Гайда О.М., Лучко Й.Й.

НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ ПІД ЧАС ПОЛІМЕРИЗАЦІЇ

Температурно-хімічна усадка мономерів при полімеризації та пружно-в'язкі властивості полімерів. Властивості композиційного матеріалу головним чином залежать від якостей окремих його фаз та від їх взаємодії. Конструкційні якості кожного матеріалу визначаються його міцністними і деформаційними властивостями. Міцність полімерів тісно пов'язана з їх деформаційними властивостями, які залежать від їх будови та фізичного стану. По фізичним структурним ознакам полімери можуть бути аморфні орієнтовані, кристалізуючі, кристалічні ізотропні і кристалічні орієнтовані. Як показують дослідження [1, 2, 3, 4, 5, 6 та ін.], в різноманітних фізичних станах полімеру його характер, деформації і руйнування отримуються різні.

Для просочування бетону як правило, застосовуються малов'язкі мономери, які після полімеризації стають твердими склоподібними полімерами (метилметакрилат, силоксан, стирол та ін.). Їх основні властивості наведені в табл.1.

Полімеризація - це реакція сполучення. Молекули сполучаються одна з одною хімічними силами в довгі (полімерні) ланцюги чи просторові утворення молекул мономерів. Для цього потрібна енергія, яка може бути введена в систему у вигляді тепла, світла, іонізуючого випромінення чи у вигляді вільних радикалів (ініціаторів). В зв'язку з цим розрізняють термічну, фотохімічну, радіаційну полімеризацію та полімеризацію за допомогою хімічних ініціаторів. Для полімеризації просочених бетонних виробів, переважно, застосовується термічна або радіаційна полімеризація.

Мономер полімеризується безпосередньо в порах бетону. Однак, процес переходу легко рухомої рідини - мономерів у твердий стан - в полімері не змінюється. При переході з рідкого стану у твердий (склоподібний) полімер набуває властивості твердого тіла. Температура, при якій в'язкість рідини наближається до в'язкості твердого тіла називається температурою скловання. В процесі полімеризації через виникнення нових хімічних зв'язків

змінюються не тільки властивості полімеру, але і його об'єм. В зв'язку з цим, під час полімеризації проходить сильне зменшення (усадка) об'єму мономеру на 15-30%. За даними [3,4], хімічна і термічна усадка стиролу досягає 16%, а метилметакрилату - 24%. Об'єм отриманого полімеру завжди менший від об'єму мономеру.

Таблиця 1 - Основні властивості мономерів та полімерів

Мономер	В'язкість при 20°C	Температура скловання, град С	Межа міцності полімеру, МПа		Модуль пружності полімеру $E \cdot 10^{-3}$ МПа
			при стисканні	при розтягуванні	
Стирол	0,73	145	85	56	3,1-3,3
Бутилстирол	0,82	218	-	-	3,2-3,4
Монохлористирол	-	180	-	-	-
Полієфірстирол	0,84	-	160	80	3,6-3,7
Епоксистирол	-	-	180	70	-
Діалілфталат	0,78	300	153	47	-
Вініліденхлорид (І,І дихлоретилен)	-	37	53	31	-
Вінілацетат	-	72	-	35	-
Метилметакрилат	0,57	100	102	67	3,4-3,6
Метилакрилат	0,59	80	-	-	-
Етилакрилат	0,62	100	-	-	-
Акрилонитрил	-	78	-	-	-
Ацетатвініл	0,50	100	75	56	2,8-3,0

Завдячуючи хімічним зв'язкам речовина ущільнюється, коефіцієнт ущільнення чи упаковки для більшості аморфних полімерів знаходиться у межах 0,62 - 0,67 [3]; для стиролу - 0,63, метилметакрилату - 0,65. З урахуванням того факту, що мономер починає полімеризуватись на межі з бетоном, причому хімічними та фізичними силами зчіплюється з ним, у створеному полімері через хімічну й термічну усадки виникають великі внутрішні напруження, які відразу ж релаксують. Зміна фізичних якостей мономеру при переході в полімер більш швидко протікає

на початкових стадіях полімеризації, а в подальшому сповільнюється [3]. Дані [2, 3] показують, що на процес полімеризації, крім інших факторів, в значній мірі впливає температура. Чим нижча температура, тим більше часу необхідно для повного перетворення мономера в полімер і тим більше виявляється релаксація напружень.

Найбільші напруження в полімері (розтягу) і в бетоні (обтискання) з'являються при їх вистиганні. Поява цих напружень відбувається через різницю коефіцієнтів температурного розширення бетону і полімеру, а також їх фізико-хімічну усадку.

Як вже було сказано, після полімеризації мономер стає твердим склоподібним полімером, який заповнює прохідні пори, тріщини і капіляри бетону і обтискає його. Обтискання при охолодженні відбувається через те, що коефіцієнти температурного розширення α_T , $\alpha_{T,p}$ полімерів, які застосовуються для просочування бетону, в декілька разів більше α_{Tb} бетону (α_T бетону рівний $1 \cdot 10^{-5}$, поліметилметакрилату - $(7 \pm 2) \cdot 10^{-5}$, а полістиролу - $(7 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ на 1°C). Як відомо, склоподібні полімери зберігають працездатність при більших деформаціях, які часом досягають сотні відсотків. При невеликих напруженнях склоподібний полімер деформується пружно. При хімічній і температурній усадці полімеру напруження обтискання бетону набагато менші від напружень полімеру, які релаксують, причому релаксація не закінчується навіть протягом декількох місяців [7, 8].

Релаксація напружень в полімері - це процес устанавлення статичної рівноваги в композиції бетон-полімер, в першу чергу, у наповнювачі - полімері. Час релаксації визначається температурою і енергією активації ΔE . Залежність часу релаксації τ від температури T і напруження σ виражається рівнянням Журкова

$$\frac{\Delta E - \alpha\sigma}{RT} = \tau_0, \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0 e,$$

де α - постійна; R - так звана газова постійна, яку можна приймати рівною 8,314 дж/моль.град.

Залежності для визначення часу релаксації отримуються застосуванням різноманітних реологічних моделей [6, 9, 10, 11].

Аналіз простіших моделей Максвелла, Кельвіна, Фойгта або їх варіантів показує, що деформативність полімеру і тим самим релаксація напружень переважно залежать від модуля пружності E і в'язкості η , котрі в свою чергу залежать від температури. Аналіз відомих формул для визначення проходження релаксаційних процесів в полімерах показує, що для аналізу напружено-деформованого стану бетонополімеру і для практичних розрахунків час релаксації зручніше визначати за залежностями, побудованих на технічних гіпотезах повзучості, відображаючи реальну поведінку полімеру при даній температурі і рівні напружень [12]. При цьому час релаксації отримує простий фізичний зміст як час, протягом якого повна деформація зразка, який знаходиться під дією постійного напруження, дорівнює подвоєній пружній повзучості. Пластичні деформації полімеру за гіпотезою старіння [13]

$$\varepsilon_{pl} = \Omega \sigma^p \quad (2)$$

та за гіпотезою протікання [14]

$$\varepsilon_{pl} = B \sigma^p, \quad (3)$$

де ε_{pl} - швидкість пластичної деформації; σ - напруження; Ω - функція повзучості, яка залежить від часу і температури; n - показник, який залежить від часу та температури і вигляду матеріалу.

Напруження з врахуванням релаксації можна розраховувати за наступними залежностями [13]: за гіпотезою старіння

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{\left[1 + nE\sigma^{n-1}\Omega\right]^{\frac{1}{n}}}, \quad (4)$$

або за гіпотезою протікання

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{\left[1 + (n-1)E\sigma^{n-1}\Omega\right]^{\frac{1}{n-1}}}, \quad (5)$$

де σ_0 - початкові напруження.

Згідно з гіпотезою протікання Л.М. Качанова

$$\left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \right)^{1-n} = 1 + (n-1) \frac{t}{t_R}, \quad (6)$$

або при $t_R = \eta/E$,

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = \sqrt[1+(n-1)\frac{Et}{\eta}]{1}. \quad (7)$$

Як показано вище, модуль пружності полімеру E при зміні температури до 80-100°C незначно змінюється і його впливом при розрахунку релаксації можна знехтувати [15].

Найбільший вплив на релаксацію напружень має зміна в'язкості η , яка більш чутлива до зміни температури, ніж E . Однак, вважається [2, 3], що при температурі скловання в'язкість полімерів $\eta=10^{12}$ Па/сек., тобто наближається до в'язкості твердих тіл і при охолодженні майже не змінюється. При розрахунку $\sigma(t)$ за формулою (7) впливом зниження температури при охолодженні можна нехтувати.

Завдяки релаксації усадкові і температурні напруження як полімеру, так і бетону зменшуються і початкові розміри бетону відновлюються. Це і є однією з причин набухання бетонополімерних виробів, яке спостерігаються після полімеризації, а також і виявлення так званої від'ємної повзучості при невеликих стискаючих напруженнях.

Розрахункова схема напружено-деформованого стану бетону при температурно усадочних деформаціях полімеру. Проведений аналіз [1, 2, 3, 4, 5 та ін.] дозволяє під час розрахунку напружено-деформованого стану бетону, просоченого полімерами, прийняти його структурну схему з врахуванням наступних допущень:

1. Бетон вважається однорідним матеріалом, хаотично по всьому об'ємі пронизаний порами різноманітної величини і форми.

2. Пори в бетоні розподілені по об'єму однаково в усіх напрямках.

3. Завдяки малій кількості деформацій і напружень в бетоні від усадки полімеру під час полімеризації і охолодженні, повзучістю в бетоні нехтуємо.

4. В елементарному об'ємі бетонополімер вважається неоднорідним матеріалом, який складається з бетону і полімеру, які працюють сумісно.

5. Кількість полімеру в бетонополімері вважаємо однаково розподіленою в усіх напрямках.

6. Полімер розглядаємо як попередньо напружений елемент, який обтискає бетон.

7. В полімері приймається лінійна повзучість.

Ці припущення майже повністю відповідають дійсності, оскільки вони обґрунтовані проведенням аналізом взаємозв'язку структури і властивостей бетону і полімеру.

Структура бетонополімеру - це структура з взаємопроникаючими компонентами. Відмінною рисою цієї структури є безперервна протяжність речовини будь якого компоненту в усіх напрямках. Як показують дослідження властивостей таких структур, хаотичну систему бетонополімеру, відповідним чином перерозподіляючи її компоненти в просторі, можна замінити впорядкованою [16]. Для адекватності необхідно витримувати якість компонентів цих структур і їх однакову об'ємну концентрацію. Така заміна хаотичної структури впорядкованою має принципове значення, визначає хід подальшого дослідження і дає підстави вважати, що її напружений і деформований стан також буде адекватним. Наше завдання з вивчення ступеню обтискання бетону полімером стосовно прийняття заміни хаотичної системи впорядкованою є також правомірним. При цьому зусилля, діюче в будь якому напрямку, завжди можна розкласти на рівнодіючі в трьох вибраних напрямках.

На Рис. 1 показана заміна хаотичної структури (Рис.1a) бетонополімеру адекватною впорядкованою (Рис.1b) та елементарної розрахункової частинки (Рис.1c). Об'єм полімеру в цій елементарній частинці позначимо V_p , а бетону $V_b = a^3$. Відносна кількість полімеру

$$\beta_p = \frac{V_p}{V_b}. \quad (8)$$

Приймаючи $V_p = 3A_p a$ з (8) отримуємо

$$\beta_p = \frac{3A_p \alpha}{a^3} = \frac{3A_p}{a^2} \quad \text{або при } A_b = a^2$$

$$\beta_p = \frac{3A_p}{A_b}. \quad (9)$$

Тоді площа поперечного перерізу елементарного полімерного стрижня

$$A_p = \frac{\beta_p}{3} A_b. \quad (10)$$

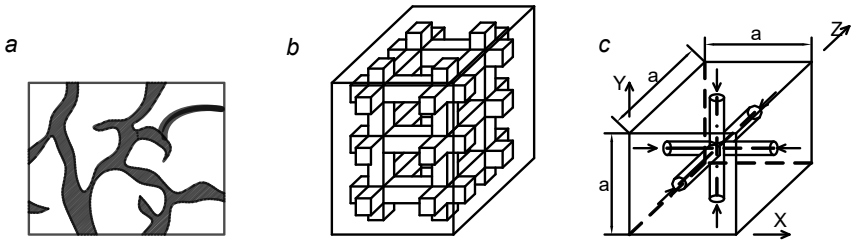


Рисунок 1 - Схема заміни хаотичної структури (а) бетонополімера адекватною впорядкованою (б) і прийняття елементарної розрахункової частинки (с)

Варто відзначити, що визначення об'ємного напружено-деформованого стану такого неоднорідного тіла має ряд своїх особливостей. Як вже відзначалось, напруження в бетоні викликаються зменшенням довжини відповідно направленої полімерної “арматури”. Розрахунок напруженого стану бетонополімеру в пружній стадії можна вести, приймаючи допущення теорії пружності. Однак, необхідно враховувати взаємозв'язок зусиль і деформацій в усіх напрямках. Тому звичайні принципи теорії пружності тут застосовувати не можливо. Визначення напруженого стану таких неоднорідних систем можна

проводити методом наближень, послідовно враховуючи взаємозв'язок зусиль і деформацій в усіх напрямках.

Для розробки методу розрахунку напруженого стану бетонополімеру від температурно-усадкових деформацій полімеру необхідно розглянути ряд специфічних питань теорії пружно-повзучого тіла Маслова-Арутюняна.

Бетонополімер - композиційний матеріал та його конструкційні властивості повинні визначатись з врахуванням всіх його технологічних факторів - головним чином, сушки та полімеризації, які викликають появу значних внутрішніх деформацій та напружень. Розрахунок напружень та деформацій в бетоні та арматурі можна вести по пружній стадії роботи, оскільки через швидкість сушки можна вважати, що пластичні деформації не встигають проявитись.

Таким чином, для розробки методики розрахунку початкового напружено-деформованого стану бетонополімеру від обтискання полімером під час полімеризації запропонована модель, за якою хаотична система розподілу компонентів у просторі приведена до упорядкованої. Встановлена можливість виразити поперечний переріз полімеру, що обтискає бетон через його об'єм.

Література

1. **Бартенев Г.М.** Прочность и механизм разрыва полимеров. Успехи химии, 24, 1955, № 7.
2. **Кобенко П.П.** Аморфные вещества. М., - Л. Изд. АН СССР, 1952.
3. **Тагер А.А.** Физико-химия полимеров. М., «Химия», 1978.
4. **Гайда О.М.** Технологічні процеси та режими насичення бетонних та залізобетонних виробів. //Зб. наук. пр. Діагностична довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій.- Львів: Каменяр, 2005.-вип. 7.-с.38-41.
5. **Лучко Й.Й., Гайда О.М., Лазар В.Ф.** Розрахунок температурних перепадів у перерізах елементів під час просушування. //Науковий вісник. Мукачівський технологічний інститут. Вип.-1.-с.-7-76.

6. Лучко Й.Й., Сулим Г.Т., Киряк В.І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності. //Львів: Каменяр, 2004.-885с.

7. Каргин В.А., Слонимский Г.А. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М., «Химия», 1967.

8. Тобольский А. Свойства и структура полимеров. М., «Химия», 1964.

9. Баженов Ю.М., Егерев В.К., Зайдеман И.А., Кушнарв Е.А. Математическая модель процесса полимеризации в капиллярнопористых телах. Труды института «Водгео», вып.55, 1975.

10. Козлов П.М. Применения полимерных материалов в конструкциях работающих под нагрузкой. М., «Химия», 1966.

11. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига, 1966.

12. Миненков Б.В., Стасенко И.В. Определение времени релаксации пластмасс с помощью технических гипотез ползучести. Сб. трудов МВГУ «Применение пластмасс в машиностроении», 5, 1965.

13. Расчет на прочность в машиностроении. Т. Ш. Под ред. Пономарева С.Д. М., 1958.

14. Оатул А.А., Кутин Ю.Ф., Пасешник В.В. Сцепление арматуры с бетоном (обзор исследований по разработке основ теории), Известия ВУЗов, Строительство и архитектура, 1977, № 5.

15. Финдли В. Ползучесть и релаксация температурных напряжений в авиационных конструкциях. М., 1961.

16. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л., «Энергия», 1974.