

УДК 692.542.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.7.913

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОЛІМЕРБЕТОНІВ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

БЕРЕЗЬЮК А. М.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, проф.,

ГАННИК М. І.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ПАПІРНИК Р. Б.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

МАРТИШ О. П.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 732-37-76, e-mail: [berezykanatoliy@gmail.com](mailto:berezykanatoliy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>2</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 341-64-38, e-mail: [gannyk.mykola@pdaba.edu.ua](mailto:gannyk.mykola@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-3278-9232

<sup>3\*</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 528-84-46, e-mail: [ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua](mailto:ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

<sup>4</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 410-42-20, e-mail: [martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua](mailto:martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

**Анотація. Постановка проблеми.** В сучасній практиці будівництва значну роль відіграють композиційні матеріали з високим рівнем стійкості, а саме полімербетони. У зв'язку з безперервним зростанням потреб у застосуванні стійких до агресивного середовища будівельних матеріалів і в Україні, і в світових масштабах, а також перспективою використання їх у будівництві, металургії, хімічній промисловості, тематика досліджень присвячена деформаціям полімербетонів у різних середовищах за підвищених температур. **Мета роботи:** пошук механізмів підвищення стійкості полімербетонів в агресивному середовищі. **Об'єкт дослідження** – полімербетон на модифікованих фуранових смолах. **Предмет дослідження** – вивчення особливостей деформацій (а саме повзучості) полімербетону в різних середовищах (вода, сірчана кислота) при різних температурах. **Основна частина.** Дослідженнями визначено параметри деформацій полімербетонів у різних середовищах. **Висновки.** Визначено параметри деформації полімербетонів на модифікованих фуранових смолах у гарячих розчинах сірчаної кислоти. Доказано, що зниження міцності і деформаційних властивостей залежить також від гігроскопічності бензосульфокислоти. Показано, що за одночасної дії агресивного середовища і температури в напруженому стані явище повзучості набуває більш інтенсивного характеру, полімербетон руйнується у значно коротші терміни.

**Ключові слова:** полімербетон, фуранові смоли, адгезія, бензосульфокислоти, повзучість, адсорбція, тріщини, агресивне середовище

## STUDY ON POLYMER CONCRETE DEFORMATIONS IN DIFFERENT ENVIRONMENTS AT HIGH TEMPERATURE

BEREZYUK A.M.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Prof.,

HANNYK M.I.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

PAPIRNYK R.B.<sup>3\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

MARTYSH O.P.<sup>4</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

<sup>1</sup> Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 732-37-76, e-mail: [berezykanatoliy@gmail.com](mailto:berezykanatoliy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>2</sup> Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 341-64-38, e-mail: [gannyk.mykola@pdaba.edu.ua](mailto:gannyk.mykola@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-3278-9232

<sup>3\*</sup> Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 528-84-46, e-mail: [ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua](mailto:ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

<sup>4</sup> Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 410-42-20, e-mail: [martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua](mailto:martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

**Abstract. Problem statement.** High stability composite materials, such as polymer concrete, play a significant role in modern practice. Due to a continuing demand for the use of building materials resistant to aggressive environments both in Ukraine and globally, as well as their prospective use in construction, metallurgy, and chemical industry, the investigation deals with deformations of polymer concrete in various types of environment at high temperature. **The purpose of the research** is to find mechanisms to increase the stability of polymer concrete in aggressive environment. **The object of the study** is polymer concrete based on modified furan resins. **The subject of the study** is deformation characteristics (namely creep) of polymer concrete in different environments (water, sulfuric acid) at different temperatures. **Results.** In the course of research of the deformation parameters of polymer concrete in various environments were identified. **Conclusions.** The deformation parameters of polymer concrete on modified furan resins in hot sulfuric acid solutions were determined. It has been proved that the decrease in strength and deformation properties also depends on the hygroscopicity of benzosulfonic acid. It is shown that under simultaneous influence of aggressive environment and temperature in a stressed state the phenomenon of creep is more intensive and the polymer concrete is destroyed in a short time.

**Keywords:** *polymer concrete; furan resins; adhesion; benzosulfonic acids; creep; adsorption; cracks; aggressive environment*

**Постановка проблеми.** В сучасній практиці будівництва значну роль відіграють композиційні матеріали з високим рівнем стійкості, а саме полімербетони. Проблема ремонту, реконструкції і будівництва нових промислових споруд і агрегатів (футеровка ванн, котлів, печей) потребує великої кількості цих матеріалів. Полімербетони являють собою штучні будівельні конгломерати, отримані шляхом суміщення синтетичних зв'язуючих із мінеральними наповнювачами.

**Аналіз** сучасних експериментальних і літературних даних [1; 3] показує значні переваги застосування смол на основі полімерів форфууролацетатна смола (ФА) та форфууролацетатний мономер (ФАМ), отриманих у результаті реакції поліконденсації фурфууролау й ацетону. Як затверджувачі фуранових смол у більшості випадків використовуються бензосульфокислоти (БСК).

У зв'язку з безперервним зростанням потреб у застосуванні стійких до агресивного середовища будівельних матеріалів і в Україні, і в світових масштабах, а також перспективним використанням їх у будівництві, металургії, хімічній промисловості, тематика досліджень присвячена деформаціям полімербетонів у різних середовищах за підвищених температур.

**Мета роботи** – пошук механізмів підвищення стійкості полімербетонів в агресивному середовищі.

**Об'єкт дослідження** – полімербетон на модифікованих фуранових смолах.

**Предмет дослідження** – вивчення особливостей деформацій (а саме повзучості) полімербетону в різних середовищах (вода, сірчана кислота) за різних температур.

**Методика.** Проведення досліджень показано на кінематичній схемі установки з порівнянням результатів двох складів полімербетонів за різних температур.

**Наукова новизна.** Показано перетворення адсорбційних шарів на тріщини, розміри яких наближаються до критичних. Наведено докази, що зниження міцності і деформаційних властивостей залежить також від гігроскопічності бензосульфокислоти, яка дає можливість послабленню адгезійних сил зчеплення.

**Практична значущість.** Високі показники статичної і динамічної міцності, зносостійкості і корозійної стійкості полімербетонів дозволяють використовувати їх у різних галузях виробництва.

**Виклад результатів.** Дослідження проводились у декілька етапів.

На першому етапі вивчалися деформації у водному середовищі. Для цього використовували установку, розроблену в

1970-х роках у науково-дослідному інституті залізобетону (рис. 1).

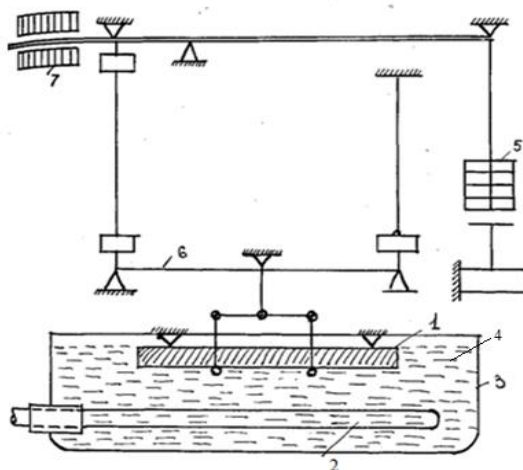


Рис. 1. Кінематична схема установки: 1 – зразок; 2 – тен; 3 – ванна; 4 – агресивна рідина; 5 – вантаж; 6 – система важелів; 7 – противага

Перед дослідженням зразки полімербетону різного складу установлювали у ваннах і заливали водою. Підігрівали воду за допомогою трубчастих електронагрівачів, установлених на дні ванни. Регулювання температури проводили за допомогою реле з точністю  $\pm 2...3$  °С. Після досягнення необхідної температури води зразки завантажували постійно діючим

навантаженням із важільними системами. В момент закінчення навантаження знімали показники індикатором.

Дослідження проводились на двох складах полімербетону № 1 і № 4 за температур води 40, 60 і 80 °С. Величина напруги не перевищувала 30 % від межі міцності під час згинання (табл. 1).

Таблиця 1

**Склад полімербетонної суміші на термореактивних фуранових смолах**

№ п/п	Шифр складу	Склад полімербетону									
		за масою					у відсотках				
		Ф	Н	П	Щ	О	Ф	Н	П	Щ	О
1	ЩГ-10/ПК-1/Н1	220	275	777	1073	55	9	11	32	45	2
2	ЩГ-10/ПК-1/Н4	230	288	766	1059	58	10	12	32	44	2
Примітка:											
Умовні позначення		Назва компонентів полімербетонної суміші									
ЩГ-10		Щебінь гранітний фракції 10 мм									
ПК-1		Пісок кварцовий крупний Мкр - 2,5÷3,5									
Н1		Андезитове борошно									
Н4		Молотий кокс									
Ф		Фуранова смола типу ФА або ФАН									
О		Бензосульфокислота (БСК)									

Результати досліджень полімербетону на модифікованих фуранових смолах у воді наведені на рисунку 2. Із даних графіків видно, що повзучість зразків полімербетону у воді за підвищених температур досить велика і набагато перевищує деформації

зразків полімербетону у сухому стані і у воді за нормальної температури.

Результати досліджень зразків полімербетону 1 і 4 складу у воді за температур 40, 60 і 80 °С наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати досліджень полімербетону на модифікованих фуранових смолах у воді за підвищених температур

Склад	Темпер. середовища, °С	Тривалість дослідження, доба	Навантаження в частинах від руйнування	$f_0$	Повні деформації (прогини) $f$ , мм			$f / f_0$
					діб	діб	діб	
1	40	170	0,2	0,22	0,37	0,43	0,48	2,18
	60	170	0,2	0,27	0,46	0,53	0,60	2,21
	80	170	0,2	0,33	0,61	0,65	0,70	2,12
4	40	170	0,2	0,28	0,60	0,68	0,77	2,75
	60	170	0,2	0,32	0,64	0,75	0,90	2,81
	80	170	0,2	0,42	0,74	0,85	зруйнувались	-

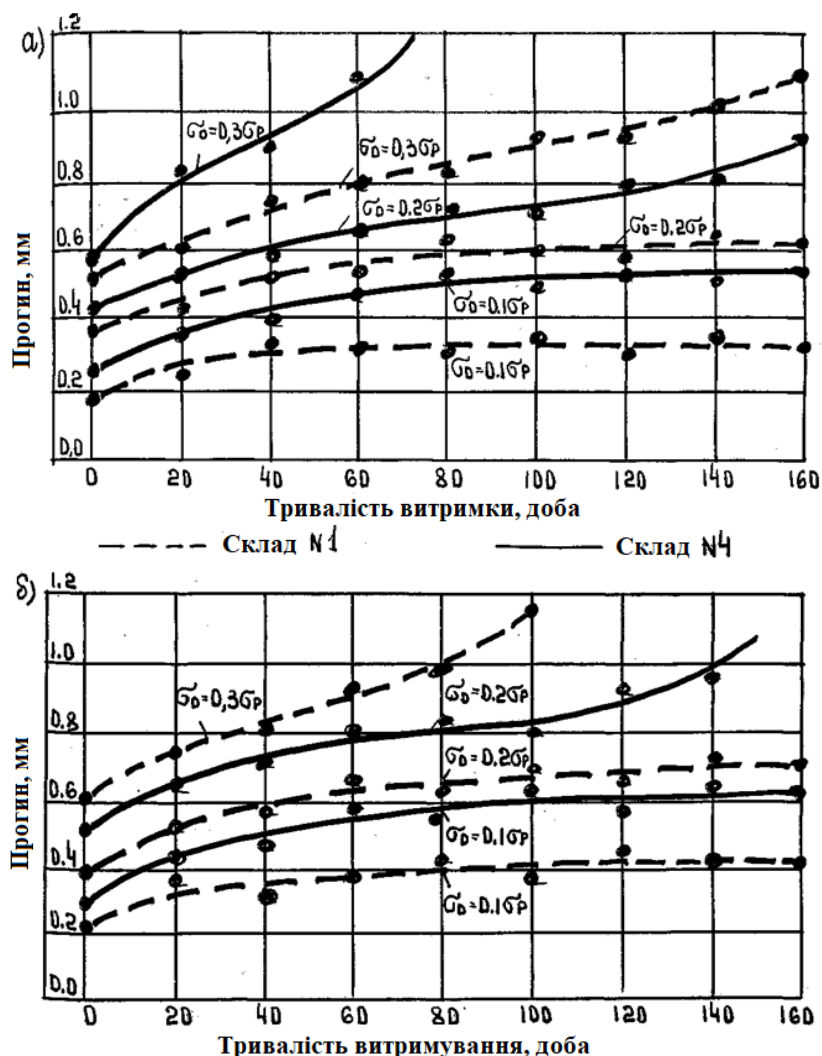


Рис. 2. Криві повзучості зразків із модифікованого полімербетону ФАКС, який досліджується у воді: а – за  $t = 60 \pm 2$  °С; б – за  $t = 80 \pm 2$  °С

Як видно із рисунка 2 криві повзучості зразків, досліджуваних у воді за підвищених температур, мають незатухаючий характер у часі при напругах 0,2–0,3 межі міцності полімербетону під час короточасних досліджень на згинання.

Експериментальні дані, отримані в результаті порівняльного вивчення повзучості зразків першого і четвертого складу в цих умовах середовища показали, що довговічність полімербетону значною мірою залежить від його складу.

Деформація повзучості зразків на щебені і піску з бою кислотостійкої цегли (склад № 1) за однакових напругах згинання значно менша порівнянно зі складом на гранітному щебені і кварцовому піску (склад № 4).

Якщо у зразках першого складу (у воді за  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) повні прогини після закінчення 170 діб не перевищували пружність більше, ніж у 2,12 рази, то зразки четвертого складу руйнувалися.

Якщо врахувати що вода – це поверхнево-активна речовина, тоді руйнування зразків можна пояснити на основі загального фізико-хімічного і механічного явища, відкритого академіком П. А. Ребіндером і відомого під назвою «адсорбційного пониження міцності твердих тіл, що розвивається з прикладенням навантаження і температури».

Природа цього явища полягає в тому, що поверхнево-активні середовища знижують поверхневе натягування матеріалу, не викликаючи в ньому зворотних змін структури. Місцем вибіркової адсорбції атомів і молекул активного середовища служать дефекти структури, стики між частинками, зародки дрібних тріщин на поверхні полімербетонів. За присутності поверхнево-активного середовища полегшується виникнення і

розвиток пластичних зміщень і зародкових тріщин. У мікомасштабі це означає, що взаємодія з адсорбційно-активними молекулами допомагає перебудові і розвитку молекулярних зв'язків у твердому тілі, що і спричинює значне зниження міцності і підвищення деформативності полімербетонів.

Також проведено дослідження повзучості полімербетону в сірчаній кислоті різних концентрацій за підвищених температур. Їх виконували на двох складах полімербетону на модифікованих фуранових смолах (1 та 4) у розчинах сірчаної кислоти з температурою 60 і 80  $^{\circ}\text{C}$ , 10 і 30 % концентрації.

Перед дослідженням зразки поміщали в поліетиленові чохла, куди заливали розчин сірчаної кислоти, після чого чохла герметично стискали з відкритого боку і вкладали у ванну. Залиту у ванну воду підігрівали трубчастими електронагрівачами. Після досягнення і стабілізації необхідної температури зразки завантажувалися за допомогою важільних систем постійно діючого навантаження.

Результати досліджень полімербетону на модифікованих фуранових смолах у розчинах сірчаної кислоти за підвищених температур показані на рисунках 3 і 4 та в таблиці 3.

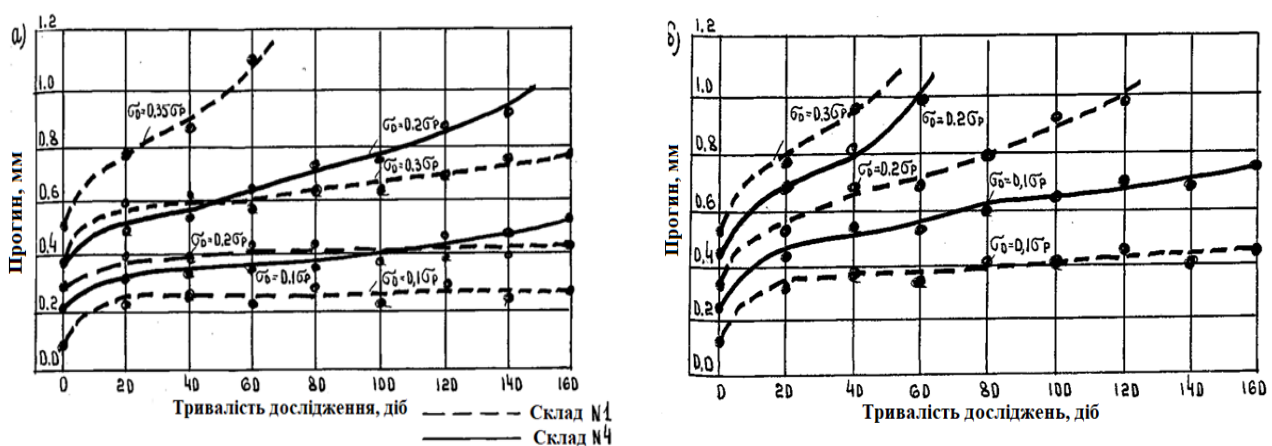


Рис. 3. Криві повзучості зразків із модифікованого полімербетону ФАКС, які досліджуються в 10 % розчині сірчаної кислоти: а – за  $t = 60 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б – за  $t = 80 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

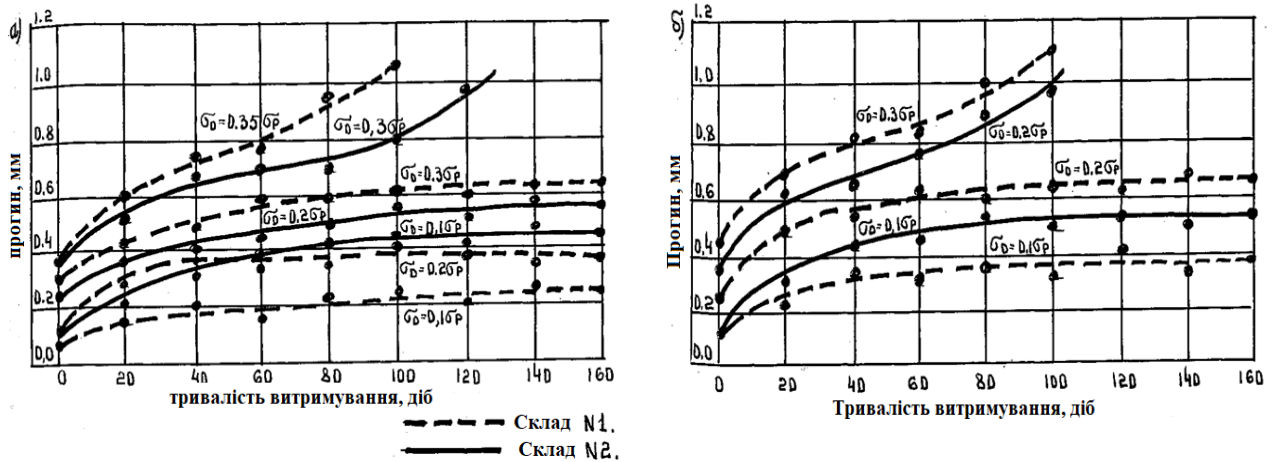


Рис. 4. Криві повзучості зразків із модифікованого полімербетону ФАКС, які досліджуються в 30 % розчині сірчаної кислоти: а – за  $t = 60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б – за  $t = 80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблиця 3

**Результати досліджень повзучості полімербетону на модифікованих фуранових смолах у гарячих розчинах сірчаної кислоти**

Склад	Агресивне середовище	Тривалість дослідження, доба	Температура середовища, $^\circ\text{C}$	Навантаження в частинах від руйнування	$f_0$	Повні деформації (прогини) $f$ , мм через			$f / f_0$ через		
						50 діб	100 діб	170 діб	50 діб	100 діб	170 діб
						1	10 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	170	60	0,2	0,26
	$\text{H}_2\text{SO}_4$	170	80	0,2	0,33	0,66	0,82	–	2,00	2,32	–
	30 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	170	60	0,2	0,14	0,33	0,36	0,39	2,35	2,57	2,79
	$\text{H}_2\text{SO}_4$	170	80	0,2	0,27	0,55	0,61	0,66	2,04	2,26	2,44
4	10 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	170	60	0,2	0,31	0,59	0,76	–	1,90	2,45	–
	$\text{H}_2\text{SO}_4$	170	80	0,2	0,40	0,90	–	–	2,25	–	–
	30 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	170	60	0,2	0,22	0,46	0,50	0,56	2,10	2,27	2,33
	$\text{H}_2\text{SO}_4$	170	80	0,2	0,36	0,70	–	–	1,95	–	–

Як видно з таблиць, зразки 4-го складу після витримки їх у 10 % розчині сірчаної кислоти під навантаженням 20 % від межі міцності за згинання і температури  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  мали повну деформацію через 50 діб – 0,59 мм, через 100 діб – 0,76 мм, а після 150 діб руйнувалися. Зразки першого складу мали відповідно 0,38; 0,42 і 0,45 мм.

У разі підвищення температури до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  деформації повзучості різко зростають і вже під напругою 20 % від межі міцності зразки 4- і 1-го складів руйнуються.

Як і очікували, криві повзучості зразків 1- і 4-го складів в гарячих ( $60 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) розчинах сірчаної кислоти 30 % концентрації також мають незатухаючий у часі характер, але порівняно із зразками,

витриманими в 10 % розчині сірчаної кислоти, їх деформації розвиваються значно повільніше.

Дія агресивного середовища на полімербетон може бути охарактеризована таким чином. Агресивне середовище, взаємодіючи хімічно з полімербетон, виключає з роботи в тілі полімербетону, перш за все, найменш стійкі компоненти. Цей процес викликає поступове зменшення ефективної площини поперечного перерізу, що і виражається в зниженні міцності зразків.

За одночасної дії агресивного середовища і температури в напруженому стані ці явища набувають більш інтенсивного характеру і полімербетон

руйнується в значно коротші терміни. Це можна пояснити тим, що утворені в полімербетоні за дії навантаження мікротріщини концентруються нерівномірно по перерізу зразка. Число їх значно збільшується в зовнішніх шарах зразків що згинаються, які перезавантаженні, де істинні напруги значно переважають середні по перерізу. Окрім того, ці зовнішні поверхні піддаються найбільш активній дії агресивного середовища.

Тріщини, що утворюються під напругами і виходять на поверхню, мають різні розміри та форми. Частина цих тріщин зворотна, а інша частина незворотна. Чим більший розмір зворотної тріщини до значення критичного радіуса, тим повільніше відбувається її закриття.

Кожне агресивне середовище в першу чергу – це середовище адсорбційно активне. За дії його на матеріал воно перш за все зазнає дії адсорбційного поглинання. Адсорбційні шари скоріш за все утворюються в незворотних тріщинах, а також у тих зворотних тріщинах, розміри яких наближаються до критичного, обмежуючи цим згинання тріщин [2] і переводячи зворотні тріщини в незворотні.

Проникаючи в тріщину, агресивне середовище починає хімічно взаємодіяти з матеріалом стінок тріщини. В ослабленій агресивною дією напруженій ділянці відбувається розрив і настає подальше розповсюдження тріщин. Із збільшенням розміру тріщини збільшується її параметр, що спричинює оголення слабких ділянок матеріалу і виключення їх із роботи

агресивного середовища, що взаємодіє з ними.

Полімербетон – не однорідний матеріал і складається із компонентів, які мають різні показники міцності і стійкості. Зниження міцності і деформативних властивостей залежить також від гігроскопічності бензосульфокислоти: поглинаючи вологу із навколишнього середовища, вона тим самим підвищує вміст води в полімербетоні.

Поглинанню вологи із навколишнього середовища сприяє також гідрофільність мінерального наповнювача. В результаті вода розчиняє бензосульфокислоту і розчинну частину полімеру, що і виражається в ослабленні адгезивних сил зчеплення через створення між смолою і поверхнею наповнювача водяного прошарку.

**Висновки.** Визначено параметри деформації полімербетонів на модифікованих фуранових смолах у гарячих розчинах сірчаної кислоти.

Показано, що за одночасної дії агресивного середовища і температури в напруженому стані явище повзучості набуває більш інтенсивного характеру, полімербетон руйнується в значно коротші терміни.

Доказано, що зниження міцності і деформаційних властивостей залежить також від гігроскопічності бензосульфокислоти, адсорбуючи вологу із навколишнього середовища, вона відповідно підвищує вміст води у полімербетоні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур : навч. посіб. Черкаси, 2011. 170 с.
2. Березюк А. М., Папірник Р. Б., Ганник М. І., Мартиш О. П., Огданський І. Ф., Гайдар А. М. Внутрішні напруги в фуранових композитах і шляхи їх релаксації полімербетонів. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. Вип. 104. 2018. С. 54–59.
3. Дворкін Л. Й., Лаповська С. Д. Будівельне матеріалознавство : підруч. Рівне : НУВГП, 2016. 448 с.
4. Березюк А. М., Ганник М. І., Папірник Р. Б., Огданський І. Ф., Мартиш О. П., Гайдар А. М. Вплив відходів хімічних виробництв на особливості полімербетонів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. Вип. 71. С. 84–88.
5. Березюк А. М., Папірник Р. Б., Ганник М. І., Мартиш О. П., Лупир О. О. Дослідження пористої структури полімербетону на основі терморективних фуранових смол. Методи визначення пористості. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 19–26.

## REFERENCES

1. Osypenko V.I., Pozdieiev S.V. and Tyshchenko I.Yu. *Budivelni materialy ta yikh povedinka pry dii vysokykh temperatur : navchalnyi posibnyk* [Building aterials and their behavior at high temperatures : a study guide]. Cherkasy, 2011, 170 p. (in Ukrainian).
2. Bereziuk A.M., Papirnyk R.B., Hannyk M.I., Martysh O.P., Ohdanskyi I.F. and Haidar A.M. *Vnutrishni napruhy v furanovykh kompozytakh i shliakhy yikh relaksatsii polimerbetoniv* [Internal stresses in furan composites and ways of their relaxation in polymer concretes] *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Iss. 104, 2018, pp. 54–59. (in Russian).
3. Dvorkin L.I. and Lapovska S.D. *Budivelne materialoznavstvo : pidruchnyk* [Construction materials science : a textbook]. Rivne : NUVHP Publ., 2016, 448 p. (in Ukrainian).
4. Bereziuk A.M., Hannyk M.I., Papirnyk R.B., Ohdanskyi I.F., Martysh O.P. and Haidar A.M. *Vplyv vidkhodiv khimichnykh vyrobnytstv na osoblyvosti polimerbetoniv* [The influence of waste from chemical production on the characteristics of polymer concrete]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture]. 2018, no. 71, pp. 84–88. (in Ukrainian).
5. Bereziuk A.M., Papirnyk R.B., Hannyk M.I., Martysh O.P. and Lupyr O.O. *Doslidzhennia porystoi struktury polimerbetonu na osnovi termoreaktyvnykh furanovykh smol. Metody vyznachennia porystosti* [Study of the porous structure of polymer concrete based on thermosetting furan resins. Porosity determination methods]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 3, pp. 19–26. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 03.01.2023.