

РОЛЬ ФІБРИ В ОРГАНІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ НА РІВНІ АРХІТЕКТУРНИХ ВИРОБІВ

ROLE OF FIBER IN THE ORGANIZATION OF THE STRUCTURE OF MATERIAL ON THE LEVEL OF PRODUCTS

**Довгань О.Д.¹, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-6140-3159, Вировой В.М.¹,
д.т.н., проф., ORCID: 0000-0001-8818-4112 (¹Одеська державна академія
будівництва та архітектури)**

**Dovgan O.D.¹, PhD, As.Prof., ORCID: 0000-0002-6140-3159, Vyrovoy V.M.¹,
D.Sc., Prof., ORCID: 0000-0001-8818-4112 (¹Odesa State Academy of Civil
Engineering and Architecture)**

Представлені результати дослідження впливу дискретних волокон на процеси структуроутворення різних дисперсних систем на рівні виробів. Аналіз властивостей композитів різного складу показав, що фібра здатна сприймати й перерозподіляти технологічні деформації, знижуючи їх вплив на тріщиноутворення в матеріалах виробів складної форми.

The article proposes to consider architectural products in the form of decorative material decorated in certain geometric frames. In order to obtain an operational-reliable material for products of complex shape, it is proposed to use reinforcement of the composite structure. Previous studies on the nature of the influence of fiber on the processes of organization of structures at the micro level of the material showed an active, peculiar and unique role of linear elements. The results of structural parameters of cement compositions presented in this paper are a continuation of previous studies. For the study of structural parameters, models of decorative elements of various shapes are taken as objects. Models were made on the basis of water-clays, water-cement and epoxy compositions. To assess the effect of linear elements, fiber of different lengths and hybrid mixtures were used. When conducting experiments on models, the change in volume mass over time, relative shrinkage, material' damage through to the value of the damage coefficient were determined. To assess the distribution of residual deformations, a graphoanalytic method and a photoelasticity method were used. Experiments on the organization of the structure of models of decorative elements of various shapes confirmed that the distribution of deformations is determined by the geometric parameters of the products. It is established that the use of fiber changes the mechanisms of organization of integral structures of products. The active participation of fiber in the organization of the structure

of products gives grounds to consider it not only as a reinforcing' components of the structure, but also an equal component of decorative materials with a directed purpose - to regulate and manage the processes of structure formation at all levels of structural heterogeneities of the material. Dispersed-reinforced structures formed under the influence of fiber change the damage of the material, perceive and dissipate volumetric integral deformations.

Ключові слова: декоративний композит, структура, дисперсна система, фібра, кластер, деформації, тріщина, пошкодженість матеріалу.
Decorative composite, structure, disperse system, fibre, cluster, deformations, crack, damage of material.

Вступ. Архітектурні будівельні вироби можна розглядати у вигляді декоративного матеріалу оформленого в певні геометричні рамки. Це означає, що структурні особливості матеріалу автоматично входять в структуру виробу [1-2]. Отже, одним із важливих завдань при отриманні експлуатаційно-надійних матеріалів є детальне вивчення їх структури на рівні виробів. Процеси та явища, які відбуваються при виробництві архітектурних деталей та елементів складної форми пов'язані з впливом технологічних (залишкових) деформацій на структурну організацію всіх рівнів неоднорідності матеріалу. Через самовільні процеси взаємодії та взаємовпливу структурних неоднорідностей відбувається об'єднання матеріалу і виробу в нерозривну цілісність. Своєю чергою під залишковими розуміють набуті структурою виробу деформації на початковому етапі структуроутворення його матеріалу, характер розподілу яких залежить, зокрема, від геометричних параметрів виробів. Деформації, що сформувалися під впливом фізико-хімічних процесів гідратації цементу та ті, котрі виникають під дією кліматичних навантажень є головною причиною утворення несучільностей (пор, тріщин, внутрішніх поверхонь розділу тощо) на всіх структурних рівнях матеріалу виробів. За думкою В.М. Вирового та ін. [3] несучільності є активними елементами структури, які першочергово реагують на зміни в навколишньому середовищі. Тож важливою науково-технічною задачею є визначення факторів регулювання залишкових деформацій в інтегральній структурі декоративних виробів складної форми за рахунок направленої використання фібри.

Аналіз останніх досліджень. Огляд літературних джерел показав, що функціональні властивості будівельних виробів, які виготовляються на основі різних цементних в'язучих, залежать від якісного і кількісного складу несучільностей. В багатьох роботах, зокрема, і власних продемонстровано, що введення дискретних волокон загалом дозволяє покращити будову капілярно-пористої структури та підвищити енергію деформування й руйнування будівельних композитів [4-8 та ін.]. Однак актуальним щодо отримання оптимальних показників армування структури залишається

питання рівномірного розподілу фібри в дисперсній матриці бетону. Лінійні частки різної природи, розмірів, кількості та залежно від типу контакту і співвідношення (за розмірами) з іншими частками дисперсної фази цементних композицій, можуть забезпечити ефективний армуючий ефект у створенні стійкого зв'язку між різними рівнями структурних неоднорідностей матеріалу.

Результати попередніх досліджень [9-10], які проводилися в три етапи на різних моделях різних дисперсних систем продемонстрували, що дискретні моноволокна здатні активно приймати участь в організації структурних агрегатів на мікрорівні бетону. Аналіз властивостей різних складів глиняних, полімерних і цементних композицій довів, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучим системам. Використання гідрофільної фібри певної геометрії в цих композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю несучильностей. Це підтверджено аналізом кінетичних кривих об'ємної маси в часі, величиною усадки, коефіцієнтом пошкодженості, розподіленням тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на поверхні моделей глиняних і цементних композицій, розподілом технологічних деформацій в структурі епоксидних композицій. Отже, враховуючи активну і своєрідну роль лінійних часток в організації мікроструктури композицій, фібра повинна дозволити сформуванню структури матеріалу на рівні виробів такою, яка володітиме оптимальними показниками властивостей. З огляду на отримані результати, це зумовило нас розпочати нові дослідження з характеру впливу дискретних волокон на процес організації структури матеріалу на рівні виробів складної форми, до яких відносяться декоративні деталі та елементи.

Метою дослідження є направлена зміна структури матеріалу на рівні декоративних виробів складної форми за рахунок використання гідрофільної високодисперсної фібри певних геометричних розмірів.

Матеріали та методи досліджень. Для дослідження структурних параметрів матеріалу на рівні виробів, в якості об'єктів прийняті моделі декоративних елементів різної форми (рис. 1). Передумовами проведення випробувань на цих моделях є однакова площа поверхні, що дозволяє об'єктивно оцінювати та порівнювати їх між собою.

Для виготовлення моделей використовувалися водо-глиняні, водо-цементні та епоксидні композиції. Використання таких в'язучих систем дозволяє провести наскрізний порівняльний аналіз від рівня мікроструктури до рівня виробів. Для оцінки впливу лінійних елементів використовували скляну фібру різної довжини в кількості 0.06 % (вводилась від маси композиції) наступних розмірів: 3 мм (склад #2), 6 мм (склад #3), 12 мм (склад #4), а також гібридні суміші 3 і 6 мм (склад #5), 3 і 12 мм (склад #6), 6 і 12 мм (склад #7) при однаковому співвідношенні волокон. Слід відмітити, що діаметр волокна є співрозмірним із середнім діаметром зерен білого цементу. Базовим в експерименті прийнято неармований склад #1 для трьох

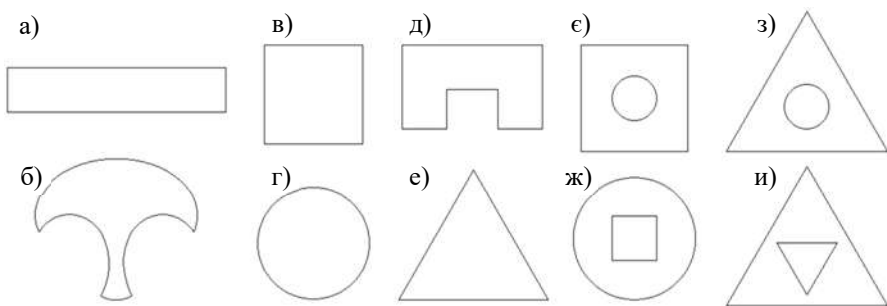


Рис. 1. Геометричні характеристики моделей декоративних елементів:
а) прямокутник; б) гриб; в) квадрат; г) круг; д) «Е»; е) трикутник; є) квадрат-круг; ж) круг-квадрат; з) трикутник-круг; и) трикутник-трикутник

в'язаних систем. Фіксованими складовими в експерименті були однакове водо-глиняне та водо-цементне співвідношення, відповідно, $V/G = V/C = 0.5$.

При проведенні дослідів на моделях водо-глиняних композицій контролювали зміну об'ємної маси в часі, відносну усадку, характер тріщиноутворення та кількісну оцінку поверхневої пошкодженості, яку визначали через коефіцієнт пошкодженості K_{Π} (патент на винахід № 5735). Розподіл усадочних деформацій визначали графоаналітичним методом і методом фотопружності на моделях епоксидних композицій. Використання цих методів, для аналізу процесів структуроутворення дисперсних систем, представлено в багатьох роботах В.М. Вирового [1-3, 11 тощо]. В даній роботі, наводяться лише результати досліджень водо-глиняних і епоксидних композицій. Проте одночасно проводилися дослідження різних за складом водо-цементних композицій, модифікованих органо-мінеральними добавками та армованих дискретною арматурою різної довжини [10].

Аналіз результатів досліджень. Дослідження впливу тільки форми моделей на розвиток технологічних деформацій дав змогу встановити, що характер геометричних параметрів впливає на початкових етапах висихання глини. На рис. 2, як приклад, представлені кінетичні криві для неармованого складу (#1) глиняної композиції. Максимальні зміни маси (об'єму) відбуваються для моделі типу «гриб». Вже на 1-у добу глиняна модель втрачає 18.3 % від початкової кількості води, що на 10-12 % більше порівняно з моделями інших геометричних характеристик. Такі інтенсивні зміни маси пов'язані на нашу думку із утворенням нових поверхонь – берегів тріщин і, відповідно, внутрішніх поверхонь розділу. На рис. 3 показано зміни стану поверхні моделей неармованого складу глини за рахунок утворення тріщин на різних рівнях неоднорідностей матеріалу. Введення фібри змінює характер пошкодженості моделей декоративних елементів (рис. 4). Порівняння стану поверхні зразків-моделей без фібри та з фіброю показує, що введення лінійних

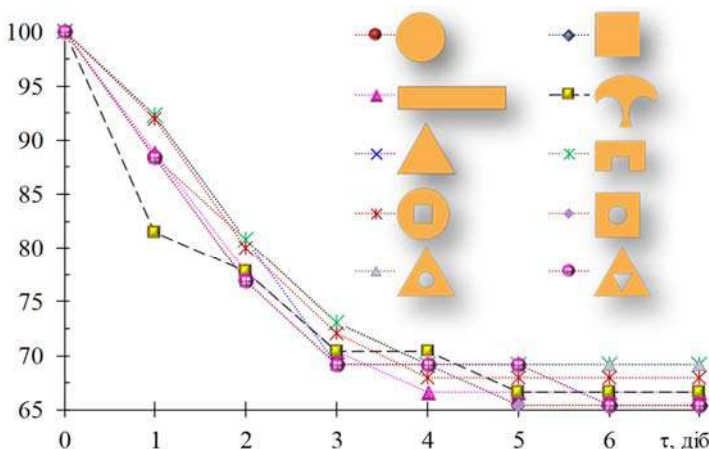


Рис. 2. Вплив форми моделей на зміну об'ємної маси в часі глини складу #1

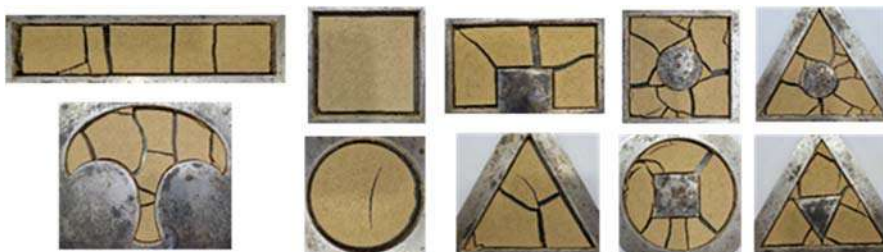


Рис. 3. Зразки складу (#1) глини в формах різної конфігурації

елементів принципово змінює характер пошкодженості. Зміна пошкодженості викликає зміну об'ємних деформацій в часі.

На рис. 5, як приклад, для моделей типу «квадрат» та «квадрат-круг» показано кінетичні криві зміни об'ємної маси армованих глиняних композицій. Звертає на себе увагу те, що зміна швидкості втрати вологи практично не впливає на терміни завершення процесів висихання. Таким чином використання в моделях виробів моделей матеріалу-глини дозволяє в короткі терміни з високою ступеню наочності проаналізувати динаміку розвитку процесів структуроутворення. В силу того, що після висушування в глині всі процеси об'ємних змін завершені, тож це дозволяє оцінити пошкодженість готового матеріалу виробів.

На рис. 6 представлені дані з сумісного впливу форми зразків і якісного складу дисперсної арматури на коефіцієнт пошкодженості $K_{\text{п}}$. Аналіз характеру пошкодженості показав, що використання середніх значень $K_{\text{п}}$ знецінює інформацію по впливу геометричних характеристик виробу на процеси структуроутворення матеріалу. Тому було прийнято рішення по визначенню $K_{\text{п}}$ в різних зонах однієї моделі, що дозволить цілеспрямовано

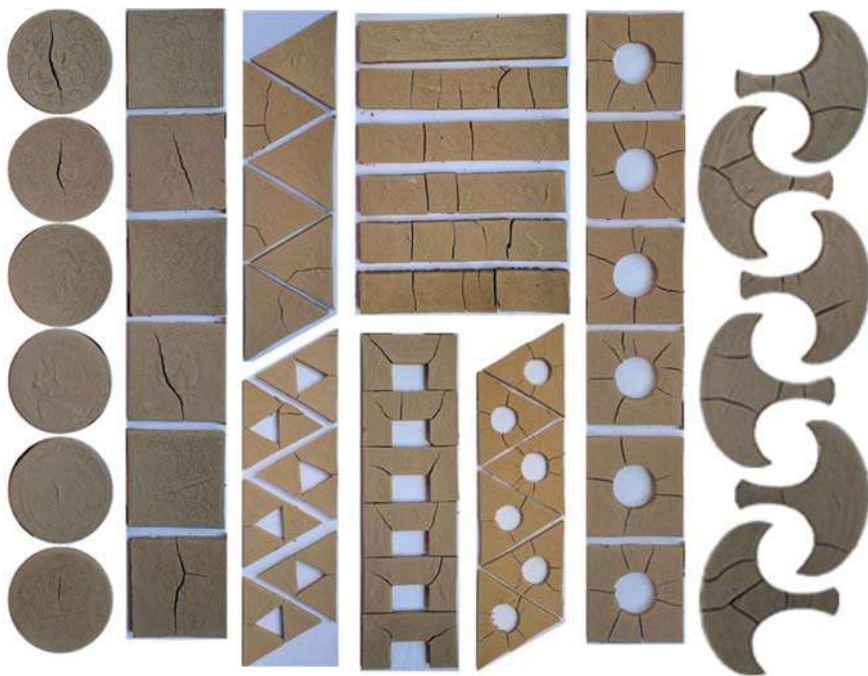
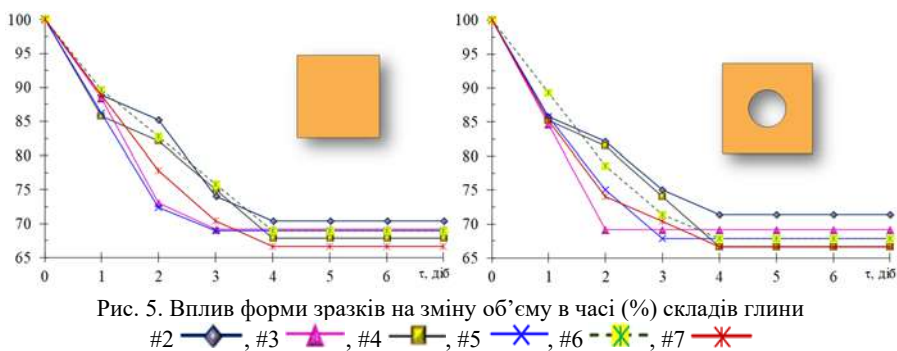


Рис. 4. Стан поверхні дискретно-армованих глиняних моделей різної форми



кількісно оцінити роль розподілу технологічних деформацій в процесах організації структури за принципом «під себе». Аналіз даних K_{Π} показав, що залежно від ділянки визначення пошкодженості матеріалу на поверхні моделі зразку, пошкодженість може змінюватися більш, ніж у два рази (наприклад, при формі моделі типу «трикутник», склад #5 – табл. 1). Істотно впливають на пошкодженість окремих ділянок моделей геометричні характеристики лінійних елементів. Так, зміна розмірів фібри для моделей типу «трикутник»

приводить до зменшення величини пошкодженості K_{Π} від 0.69 мм/мм^2 для 6 мм до 0.21 мм/мм^2 при застосуванні суміші фібри довжиною 3 і 6 мм (табл.1).

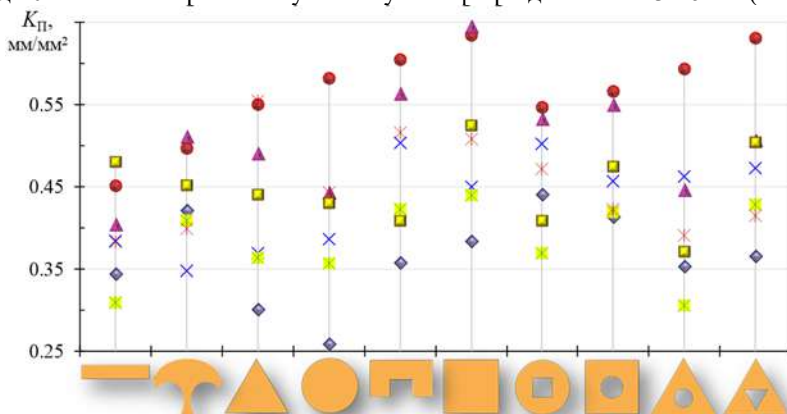


Рис. 6. Сумісний вплив геометричних характеристик і фібри на зміну K_{Π} моделей глини без фібри #1 (●) та з фіброю #2 (◆), #3 (▲), #4 (■), #5 (×), #6 (*), #7 (×)

Таблиця 1

Пошкодженість зразків на поверхні моделі типу «трикутник»

№ складу	$K_{\Pi.1}$	$K_{\Pi.2}$	$K_{\Pi.3}$	$K_{\Pi.4}$	K_{Π}
<i>неармована водо-глиняна композиція</i>					
#1 (без фібри)	0.49	0.71	0.48	0.52	0.55
<i>дискретно-армовані водо-глиняні композиції</i>					
#2 (3 мм)	0.22	0.39	0.28	0.32	0.30
#3 (6 мм)	0.41	<u>0.69</u>	0.38	0.48	0.49
#4 (12 мм)	0.31	0.64	0.37	0.45	0.44
#5 (3+6 мм)	0.30	0.51	<u>0.21</u>	0.45	0.37
#6 (3+12 мм)	0.27	0.48	0.24	0.46	0.36
#7 (6+12 мм)	0.45	0.67	0.48	0.62	0.55

Для в'ясування причин впливу геометричних характеристик моделей виробів на зміну структурних параметрів для різних в залежності від місця знаходження проведено аналіз характеру розподілу технологічних деформацій графоаналітичним методом [11], а присутність їх в структурі моделей виявлено методом фотопружності під час просвічування зразків-дисків поляризованим світлом [9]. Інтерференційні картини смуг, що виходять із досліджуваних зразків композиту, отримувались при однакових кутах нахилу і відстанях розташування поляроїда й аналізатора між собою, та відповідно зразка між ними.

Для прикладу на рис. 7 представлений розподіл залишкових деформацій для елементів типу «квадрат», «трикутник» та «гриб».

Кількісною мірою прояву об'ємних деформацій на початкових етапах структуроутворення матричного матеріалу є величина відносної усадки $\varepsilon_{в.у.}$ (рис. 8), яку розраховували за зміною об'ємної маси глиняних моделей.

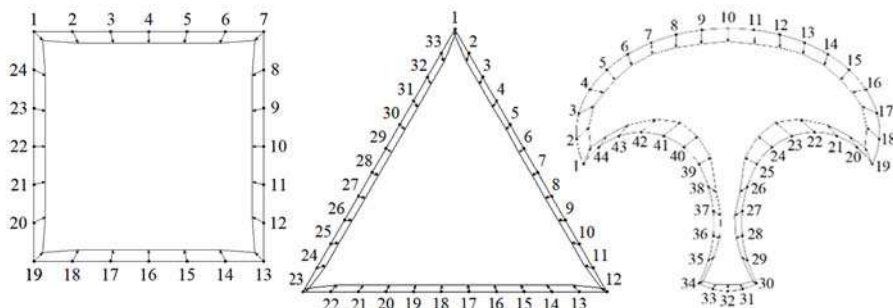


Рис. 7. Вплив геометричних характеристик моделей на розподіл деформацій

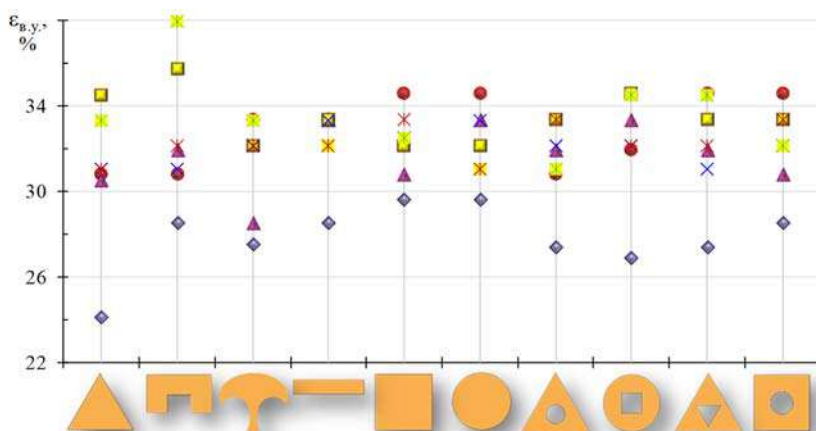


Рис. 8. Сумісний вплив геометричних параметрів форм і довжини фібри на величину відносної усадки композицій складу без фібри #1 (●) та армованих фіброю #2 (◆), #3 (▲), #4 (■), #5 (×), #6 (✱), #7 (✕)

Аналіз усадки $\varepsilon_{в.у.}$ композицій показує, що залежно від геометричних характеристик виробів виникають градієнти залишкових деформацій різні за напрямком дії та за величиною. Тож можна припустити, що такі деформації на рівні виробу (так звані інтегральні деформації), починають виникати при розвитку деформацій усадки. Виникаючі деформаційні хвилі передаються по всьому об'єму та, в разі виникнення градієнтів, викликають зміну щільності матеріалу. Подальші процеси зміни об'єму ініціюють появу та розвиток

нових деформацій, що, накладаючись на вже існуючі перепади щільності, провокують чергові структурні зміни. Подібні структурні зміни кількісно оцінюються шляхом використання коефіцієнтів пошкодженості.

Якісна картина впливу геометричних характеристик на розподіл технологічних деформацій для зразків без фібри представлена на рис. 9. Для підтвердження ефективності прийнятих методів аналізу розподілу власних деформацій в матеріалі виробів – епюри, що розраховані графоаналітичним методом, суміщались з розподілом власних деформацій, отриманих методом фотопружності.

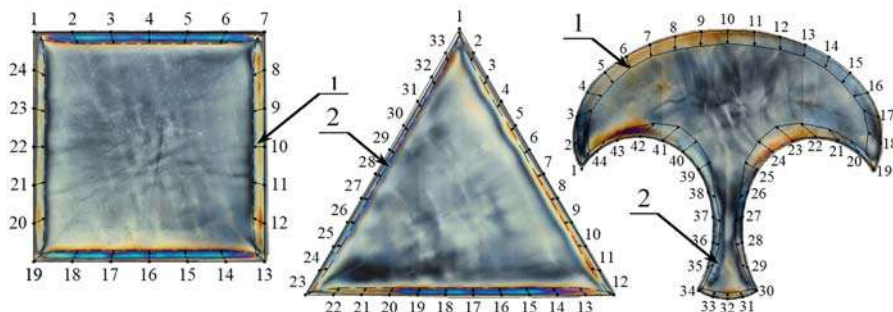


Рис. 9. Вплив геометричних характеристик виробів, виготовлених на неармованому складі полімеру, на розподіл залишкових деформацій:

- 1 – розподіл деформацій, отриманих графоаналітичним методом;
- 2 – інтерференційні полоси, отримані методом фотопружності

Аналіз дозволив засвідчити, що в залежності від геометрії виробу формуються специфічні поля деформацій, що призводять до самовільної зміни щільності матеріалу. В свою чергу, зміна щільності в період твердіння провокує зміну структури і, тим самим, зміну пошкодженості в різних ділянках матеріалу виробів. Запропонована методика може бути рекомендована для попередньої оцінки розподілу власних деформацій для декоративних елементів, що дасть змогу виявити місця, в яких виникають небажані градієнти власних деформацій. Це робить можливим корегувати форму виробів, а також приймати рішення по направленій зміні рецептурно-технологічних факторів.

Ефективним методом «розсіювання» об'ємних деформацій, як показали досліди з структуроутворення макроструктури, є введення лінійних елементів (рис. 10). Візуальний аналіз картин смуг зразків-моделей продемонстрував, що неармовані композиції (рис. 9) порівняно з гібридно-армованими (рис. 10) характеризується більшим градієнтом нерівномірності полів напружень в об'ємі композиту. Причому периферійні ділянки неармованих композицій є найбільш чутливими до зародження в них першочергово дефектів. Окремо слід відмітити, що в структурі армованих зразків спостерігається більш-менш однорідна картина перерозподілення залишкових полів напружень. Однак

дисперсна арматура, як видно, провокує локалізацію власних деформацій з

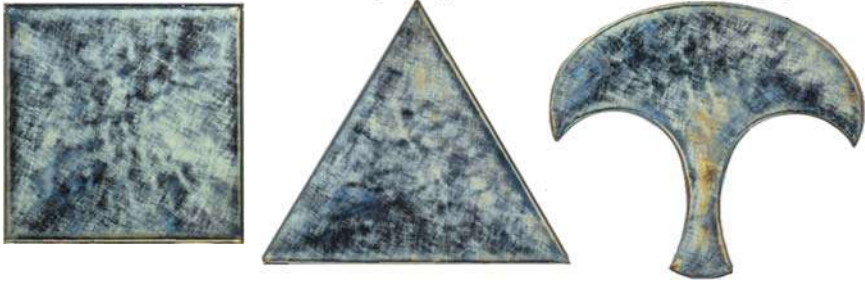


Рис. 10. Вплив геометричних характеристик виробів, виготовлених на гібридно-армованому складі полімеру, на розподіл залишкових деформацій

утворенням так званої фібрилярної структури. Тож це нівелює структурну «несхожість» окремих ділянок між собою, що відображається на кількісних показниках коефіцієнтів пошкодженості в різних зонах моделі-виробу.

Аналогічні залежності отримані на моделях декоративних елементів, виготовлених на основі водо-цементних композицій.

Висновки. Проведені дослід з організації структури моделей декоративних елементів різної форми підтвердили, що розподіл залишкових деформацій визначається геометричними параметрами виробів. Виникаючі градієнти деформації є різними за величиною і напрямком дії та ведуть до виникнення флуктуацій по щільності, що призводить до зміни умов реалізації процесів структуроутворення. Встановлено, що застосування фібри змінює механізми організації інтегральних структур. Це пов'язано – по-перше з їх унікальною присутністю одночасно бути на всіх рівнях неоднорідностей; по-друге їх присутність носить активний характер – вони «нав'язують» на кожному рівні характерну саме для них поведінку інших елементів; по-третє їх активність в структурній організації маніпулює розподілом власних деформацій однооментно на всіх рівнях неоднорідностей, що знижує величину небажаних градієнтів деформацій у виробах різної форми.

Активна участь лінійних елементів в організації структури декоративних виробів, елементів та конструкцій дає підстави розглядати їх не лише армуючими компонентами, але й рівноправними складовими декоративних матеріалів з направленим цільовим призначенням – регулювати та управляти процесами структуроутворення на всіх рівнях структурних неоднорідностей. Структури, які утворюються під впливом лінійних елементів змінюють пошкодженість матеріалу, локалізують та розсіюють об'ємні інтегральні деформації, виступають як своєрідний з'єднуючий мостик між окремими блоками на одному рівні структури та між різними рівнями структурних неоднорідностей і, таким чином, поєднують всі рівні структури в інтегральну структуру декоративних виробів.

1. Суханов В.Г., Вировой В.М., Коробко О.А. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412с.

Sukhanov V.H., Vyrovoy V.M., Korobko O.A. Struktura materialu u strukturi konstruktсии: monohrafiia. Odessa: ODABA, 2022. 412p.

2. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханова С.С., Суханов В.Г. Наукові дослідження: основи методології. Одеса: ОДАБА, 2024. 148с.

Vyrovoy V.M., Korobko O.O., Sukhanova S.S., Sukhanov V.H. Naukovi doslidzhennia: osnovy metodolohii. Odessa: ODABA, 2024. 148p.

3. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханов В.Г. та ін. Структурування та руйнування будівельних композитів: навч. посіб. Одеса, 2020. 172с.

Vyrovoy V.M., Korobko O.O., Sukhanov V.H. ta in. Strukturoutvorennia ta ruinuвання budivelnikh kompozitiv: navch. posib. Odessa, 2020. 172s.

4. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Дворкін Л.Й. та ін.; за ред. Л.Й. Дворкіна, Є.М. Бабича. Рівне: НУВГП, 2017. 331с.

Vysokomitsni shvydkotverdnuichi betony ta fibrobetony: monohrafiia / Dvorkin L.I. ta in.; za red. L.I. Dvorkina, Ye.M. Babycha. Rivne: NUVHP, 2017. 331s.

5. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. London-New York: Taylor & Francis. 2th ed., 2007.

6. Chung D.D.L. Composite materials. Engineering Materials and Processes. Springer London Dordrecht Heidelberg New York. 2th ed., 2010.

7. Andrzej M. Brant Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance. Taylor & Francis, London and New York, 2009.

8. Довгань О.Д., Вировий В.М., Довгань П.М. Водопоглинання, як функція складів декоративних бетонів. *Зб. наук. пр. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. 2020. С. 148-160.

Dovhan O.D., Vyrovoy V.M., Dovhan P.M. Vodopohlynannia, yak funksiia skladiv dekoratyvnykh betoniv. *Zb. nauk. pr. «Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy»*. 2020. S. 148-160.

9. Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М., Макарова С.С. Роль дискретної арматури в організації мікроструктури декоративних композитів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024. Вип. 10. С. 69-81.

Dovhan O.D., Vyrovoy V.M., Dovhan P.M., Makarova S.S. Rol dyskretnoi armatury v orhanizatsii mikrostruktury dekoratyvnykh kompozitiv. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura*, 2024. Vyp. 10. S. 69-81.

10. Довгань О.Д., Вировой В.М., Ляшенко Т.В., Довгань П.М. Особливості організації мікроструктури декоративних композитів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2024. Вип. 22. С. 43-56.

Dovhan O.D., Vyrovoy V.M., Liashenko T.V., Dovhan P.M. Osoblyvosti orhanizatsii mikrostruktury dekoratyvnykh kompozitiv. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, 2024. Vyp. 22. S. 43-56.

11. Соломатов В.И., Вировой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Київ: Будівельник, 1991. 144с.

Solomatov V.Y., Vyrovoy V.N., Dorofeev V.S., Syrenko A.V. Kompozytsyonnye stroytelnye materyaly u konstruktssy ponyzhennoi materyaloemkosti. Kyiv: Budivelnik, 1991. 144s.