

**РОЛЬ ДИСКРЕТНОЇ АРМАТУРИ В ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОСТРУКТУРИ
ДЕКОРАТИВНИХ КОМПОЗИТІВ**

¹Довгань О.Д., к.т.н., доцент,
aleks.dovhan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6140-3159

¹Вировой В.М., д.т.н., професор,
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

¹Довгань П.М., к.т.н.,
dovganpm@gmail.com, ORCID: 0009-0002-3603-7617

¹Макарова С.С., к.т.н., доцент,
svetlana.makarova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3237-1431
¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті пропонується декоративні матеріали і виробу розглядати у вигляді відкритих складноорганізованих систем, які перманентно взаємодіють з навколишнім середовищем і реагують на всю сукупність зовнішніх впливів. З метою збереження функціональних властивостей на заданому рівні пропонується застосовувати багаторівневе дискретне армування матеріалу виробів. Дискретна арматура, як вихідна складова здатна приймати участь в процесах структуроутворення на всіх рівнях структурної неоднорідності декоративного композиту. Механізм організації мікроструктури дисперсно-армованого матеріалу вивчався на різних моделях різних дисперсних систем. Експериментальні дослідження проводились в декілька етапів. На першому етапі використовувалися моделі фізичної взаємодії часток дисперсної фази на поверхні моделі дисперсного середовища. На другому етапі для оцінки ступеня дисперсності фібри та аналізу кінетики утворення кластерних підструктур мікроструктури армованих композитів застосовувалися фізичні моделі глиняно-водних і полімервміщуючих систем.

Здійснений аналіз моделей міжчасткових взаємодій дозволив встановити, що наповнення кластерних структур дискретною арматурою збільшує структурне різноманіття системи. Залежно від співвідношення лінійних часток і дисперсних зерен утворюються кластерні підструктури різної природи. Аналіз властивостей різних складів глиняної композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри дисперсній системі. Дослідження показали, що величина об'ємних деформацій визначається початковим складом глини. Використання фібри оптимальної геометрії в композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю дефектів. Для неспростовного доказу того, що лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу деформацій, на прикладі виготовлених фізичних моделей, розглянуто розподіл залишкових напружень і деформацій в оптично-чутливому полімері. Візуальний аналіз картин смуг полімерних зразків продемонстрував, що присутність фібри в складі композиту змінює характер розподілу об'ємних деформацій.

Ключові слова: декоративний композит, структура, фібра, дисперсна система, кластер, деформації.

Вступ. Складні умови експлуатації декоративних елементів потребують від матеріалу зберігати протягом нормованого часу певний рівень фізико-механічних властивостей та декоративних показників. Це можливо досягти за рахунок здатності матеріалу до прояву спонтанних процесів пристосування до несприятливих дій навколишнього середовища. Своєю чергою адаптивна спроможність матеріалу та виробу в цілому залежить від особливостей оформлення їх структури. Структурну будову любых об'єктів доцільно вивчати та аналізувати, як показав накопичений досвід, в рамках системного підходу. Для цього декоративні

матеріали, виробу і конструкції варто розглядати у вигляді відкритих складноорганізованих систем, які здатні до прояву процесів самоорганізації. Відкритість припускає, що система перманентно взаємодіє зі своїм оточенням та здатна адекватно реагувати на зовнішні впливи. Складні системи означають, що декоративні об'єкти являють собою певну цілісність, яка включає в себе окремі складноорганізовані підсистеми з характерними неповторними для кожної підсистеми механізмами перманентного структуроутворення. Під явищами та процесами самоорганізації, в контексті даної роботи, розуміються самовільні зміни параметрів елементів структури в індивідуальних підсистемах, що спонукає їх до прояву ефектів саморегулювання, взаємодій і взаємовпливів з метою збереження на заданому рівні базових функціональних властивостей цілісної системи.

Проведений аналітичний огляд науково-технічної інформації показав, що фізико-механічні властивості практично всіх матеріалів і виробів на основі мінеральних в'язучих залежать від якісного та кількісного складу несучильностей. До несучильностей відносяться пори, капіляри, внутрішні поверхні розділу та тріщини. Їх присутність зафіксована на всіх рівнях структурних неоднорідностей (підсистем). В силу того, що несучильності не входять до переліку вихідних складових, тож постає нагальна задача, пов'язана з відповіддю на узагальнені питання, як, чому, коли та де вони виникають. З'явившись, несучильності стають самостійними елементами структури на всіх рівнях неоднорідностей. Їх своєрідна автономність веде до активної участі в розвитку вологісних деформацій, капілярному підсосі, водопоглинанні, в дифузійних процесах масопереносу, перерозподілі власних і зовнішніх деформацій, концентрації деформацій та напружень, морозостійкості та багато інших процесів. Таким чином, несучильності слід віднести до елементів структури здатних впливати на забезпечення безпечного функціонування будівельних композитів.

Одним із ефективних методів зменшення негативної дії несучильностей, як показав огляд літератури, є застосування дискретних лінійних армуючих компонентів самої широкої номенклатури. Дискретна арматура розглядається у вигляді унікальної складової, яка одночасно присутня на різних рівнях неоднорідностей (в різних підсистемах). Вона входить до складу вихідних компонентів, що обов'язково вимагає розглядати механізми структуроутворення з участю лінійних дискретних елементів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений огляд фахових досліджень показав, щоб пояснити механізм поліпшення чи навпаки погіршення властивостей будівельних композитів належить добре вивчити мікроструктуру матеріалу виробів. Загалом отримання оптимальної структури бетону, тобто із меншою кількістю дефектів і дрібними їх розмірами, повинно ґрунтуватись на комплексному підході до конструювання структур на його мікро- й макрорівнях. В рамках поліструктурної теорії визначено, що формування якісних структур матеріалу має здійснюватися шляхом створення на кожному рівні його структурної неоднорідності певних наборів кластерних підструктур, які характеризуються більш стійкою до внутрішніх і зовнішніх впливів міжфазною границею розділу [1-4]. За даними E.J. Garboczi, D.R. Bentz та ін. [5] мікроструктура бетону є досить невпорядкованою, яка складається з надзвичайно складних агрегованих структур здебільшого з фрактальною морфологією. Представлені в [6-7] мікоморфологічні дослідження показують, що міжфазна перехідна зона цих структур є досить пористою і вважається найслабшою областю, в якій під час структуроутворення матеріалу утворюються різні дефекти. При цьому під впливом постійних внутрішніх напружень, пов'язаних із становленням мікроструктури композитів, дефекти мають здатність проростати на міжкластерну межу розділу і надалі стрімко розвиватися на стику двох фаз.

В численних роботах матеріалознавців показано, що органо-мінеральні добавки в цементних композитах позитивно впливають на процеси структуроутворення і, відповідно, покращують будівельно-технічні й декоративні властивості бетону. Із аналізу робіт В.І. Соломатова, В.М. Вирового та ін. [1-4, 8-9] випливає, що за допомогою поверхнево-активних часток наповнювачів можна управляти не лише кінетикою набору структурної міцності, але й будовою капілярно-пористої структури цементного каменю, підвищуючи його стійкість до

впливу кліматичних навантажень. Проте є протиріччя щодо впливу якісного й кількісного складу наповнювачів. Це обумовлено тим, що мікроструктура перехідної зони тісно пов'язана з дисперсною природою цементної матриці. Втім геометричні параметри і вміст зерен наповнювачів безперечно відіграють важливу роль у стримуванні накопичення дефектів і розвитку тріщин на міжкластерних границях розділу мікроструктури композиту. За даними [9-12], міжчасткові взаємодії зерен цементу і наповнювачів можна суттєво пришвидшити за рахунок використання ефективних водоредуруючих добавок, й отримати мікроструктуру бетону більш щільною, дрібнокристалічною, міцною і з більшою площею прямих контактів між агрегатами. Однак зі зростанням структурної міцності стрімко підвищується чутливість бетону до утворення дефектів на всіх рівнях. Тож актуальності набуває багаторівневе дискретне армування його структур. В дослідженнях вітчизняних і закордонних вчених встановлено [13-17], що при введенні фібри різної природи й геометрії підвищується в'язкість руйнування за рахунок уповільнення процесу утворення тріщин або створення бар'єру для них. Але поряд з конструктивним впливом, можливий і деструктивний вплив фібри на формування дисперсної структури бетону. У випадку, коли геометричні параметри, вміст чи розподіл дискретних волокон виходять за межі оптимуму, тоді може спостерігатися її «грудкування» (утворюються фіброві кластерні локальні підструктури різної форми в загальній структурі матеріалу, число прямих контактів фібрових моноволокон з матрицею значно скорочується) по всьому об'ємі або на окремих ділянках структури композиту. Через «грудкування» фібри в об'ємі матеріалу можуть виникати і розвиватися додаткові об'ємні деформації, котрі призводять до появи тріщин, як в мікрооб'ємі поверхні розділу, так і на границі розділу. Своєю чергою огляд зображень контактних зон дискретної арматури із цементною матрицею, представлених Maso J.C. в [18] показує, що вид і геометрія фібри впливає на формування міжфазної перехідної зони в композитах. Ventur A., Brant A.M., Chung D.D.L., Katz A. та ін. [13-14, 19-20] зазначають, що для отримання більш стійкого пружного зв'язку між складовими перехідної зони мікроструктури бетону необхідно використовувати високодисперсні моноволокна, котрі є гідрофільними і добре диспергуються в пластифікованій цементній суміші. При цьому занадто міцний зв'язок матриці з фіброю не є бажаним, оскільки зменшується гнучкість й режим її руйнування. Для досягнення оптимального розподілу і певного зчеплення між всіма частками цементної матриці фахівцями рекомендується для армування мікроструктури проєктувати лінійні частки довжиною $l_f < 10$ мм та, які за поперечним перерізом є співрозмірними із середнім діаметром зерен цементу й наповнювача. З огляду на це площа поверхні й тип контакту фібри з дисперсними частками є вирішальними факторами, які забезпечують ефективний армуючий ефект у створенні внутрішнього стійкого зв'язку між всіма агрегатами композиту. Однак через складність процесів гідратації цементного в'язучого на сьогодні не повною мірою розкрито сам механізм участі фібри в фізико-механічних процесах структуроутворення будівельних композитів. Представляється доцільним оптимізувати процес утворення кластерних структур за рахунок використання різної за довжиною гібридної дискретної арматури. Це дозволить ущільнити міжфазну перехідну зону, поліпшити зв'язки між структурними агрегатами, знизити кількість дефектів під час становлення структури матеріалу, а границям розділу більш рівномірно розподіляти внутрішні напруження між фазами композиту й стримувати рух тріщин в них під впливом силових і несилових навантажень. Доречно відмітити, що попередньо проведені нами дослідження структурних параметрів глиняної й цементної систем [21] дозволили встановити, що введення фібри безсумнівно призводить до зміни фізико-механічних процесів структуроутворення в'язучих систем.

Мета роботи – підвищення експлуатаційних властивостей декоративних матеріалів і виробів за рахунок направленою використання самовільних процесів багатоосередкового структуроутворення, шляхом цілеспрямованої зміни якісного і кількісного складів дискретної арматури.

Матеріали та методика досліджень. Для всебічного вивчення і підтвердження активної участі дискретних волокон в організації структури дисперсно-армованих будівельних

композитів експериментальні дослідження проводилися в декілька етапів на різних фізичних моделях різних дисперсних систем.

На першому етапі для відтворення процесу організації структурних агрегатів на мікрорівні цементного композиту використовувалися моделі фізичної взаємодії часток дисперсної фази на поверхні моделі дисперсійного середовища. Досліди проводилися в чашці Петрі. В дослідженні прийнято десять різних видів фізичних моделей: моделі дисперсних зерен або часток різної природи (три види), моделі дисперсних і лінійних часток (сім видів). Під час відтворення міжчасткових взаємодій введено такі обмеження: діаметр дисперсних зерен і поперечний переріз лінійних часток близькі за розміром; лінійні частки різні за довжиною; концентрація часток дисперсної фази в системі така, що між ними виникає сила притягання F_n ; сила зв'язку між частками більше сили тяжіння F_T ; взаємодія часток фіксувалась кожен хвилину протягом 10 хв; частки дисперсної фази розміщалися на поверхні водного середовища у вільному порядку. В ролі дисперсних зерен призначено мінеральні й органічні частки, лінійних часток виступають дискретні моноволокна (фібра) різної довжини. Залежно від природи часток, відстаней між частками та співвідношень форм дисперсних і лінійних часток в системі реалізується декілька механізмів утворення структурних агрегатів і взаємодій між ними. Для кількісного аналізу, через пройдений шлях кожної частки, обчислено середню швидкість утворення кластерів (v , мм/хв).

На другому етапі для оцінки ступеня дисперсності дискретних волокон та аналізу кінетики утворення кластерних підструктур мікроструктури армованих композитів застосовувалися фізичні моделі в'язучих систем. Дослідження модельних систем проводились на зразках-дисках розміром 100×10 мм ($\varnothing \times h$).

Для вивчення процесу структуроутворення виготовлялись сім різних за складом глиняно-водних композицій, серед яких: один склад – неармований (#1), три – армовані фіброю однієї довжини 3, 6, 12 мм (#2, #3, #4); три – гібридно-армовані фіброю різної довжини в комбінації 3 і 6 мм, 3 і 12 мм, 6 і 12 мм (#5, #6, #7). Фіксованими складовими в експерименті були водо-глиняне співвідношення $V/\Gamma = 0.5$, дискретна арматура вводилась від маси глиняної суміші в загальній кількості 0.06 %. Зразки висушувались при температурі 23 ± 2 °С. Під час досліджень структурні показники глиняних систем визначались у віці зразків 7 днів.

Для наочного підтвердження участі дискретних волокон в процесах структуроутворення виготовлялись дві різні за складом епоксидні композиції: базова без фібри (для порівняльної оцінки) та гібридно-армована фіброю довжиною 3 і 12 мм, в кількості 0.06 % від загальної маси полімерної композиції.

Аналіз результатів досліджень. Механізм структуроутворення цементно-водних і полімервміщуючих композицій на модельних системах, з використанням зерен різної природи й розмірів, детально розглянуто в ряді робіт В.М. Вирового, В.Г. Суханова, О.О. Коробко [2-4]. Результати отримані вченими дозволили дійти висновку, що початкова самоорганізація мікроструктури композитів напряму залежить від якісного й кількісного складів зерен дисперсної фази і прийнятих методів активації. Зі свого боку проведені експериментальні спостереження (*1-й етап досліджень*) за перебігом міжчасткових взаємодій, різних складів зерен, на поверхні моделей водного середовища дійсно підтверджують, що в первинно неупорядкованих дисперсних системах, залежно від природи зерен дисперсної фази і відстані між ними за однаковий відтинок часу, утворюється різна кількість структурних агрегатів, відмінних за кількістю часток і розмірами.

Для опису та наочного спостереження за процесом утворення кластерних підструктур у поєднанні із лінійними частками на рис. 1 продемонстровано дві із семи, різних за складом часток, модельних систем взаємодій дисперсних зерен і моноволокон. Представлені в роботі в спрощеному виді фізичні моделі надають змогу реально зрозуміти як первинно створюються кластерні підструктури в'язучих систем, армованих фіброю. На поверхні модельних систем виділено ділянки з частками дисперсної фази ($\tau_0 = 0$ хв), котрі впродовж 10 хв самоорганізуються у блоки різної форми «A-D» і «A-F» (τ_{10} , рис. 1, а та б). Залежно від хіміко-мінералогічного складу дисперсних часток цементу і наповнювачів, а також взаємодії

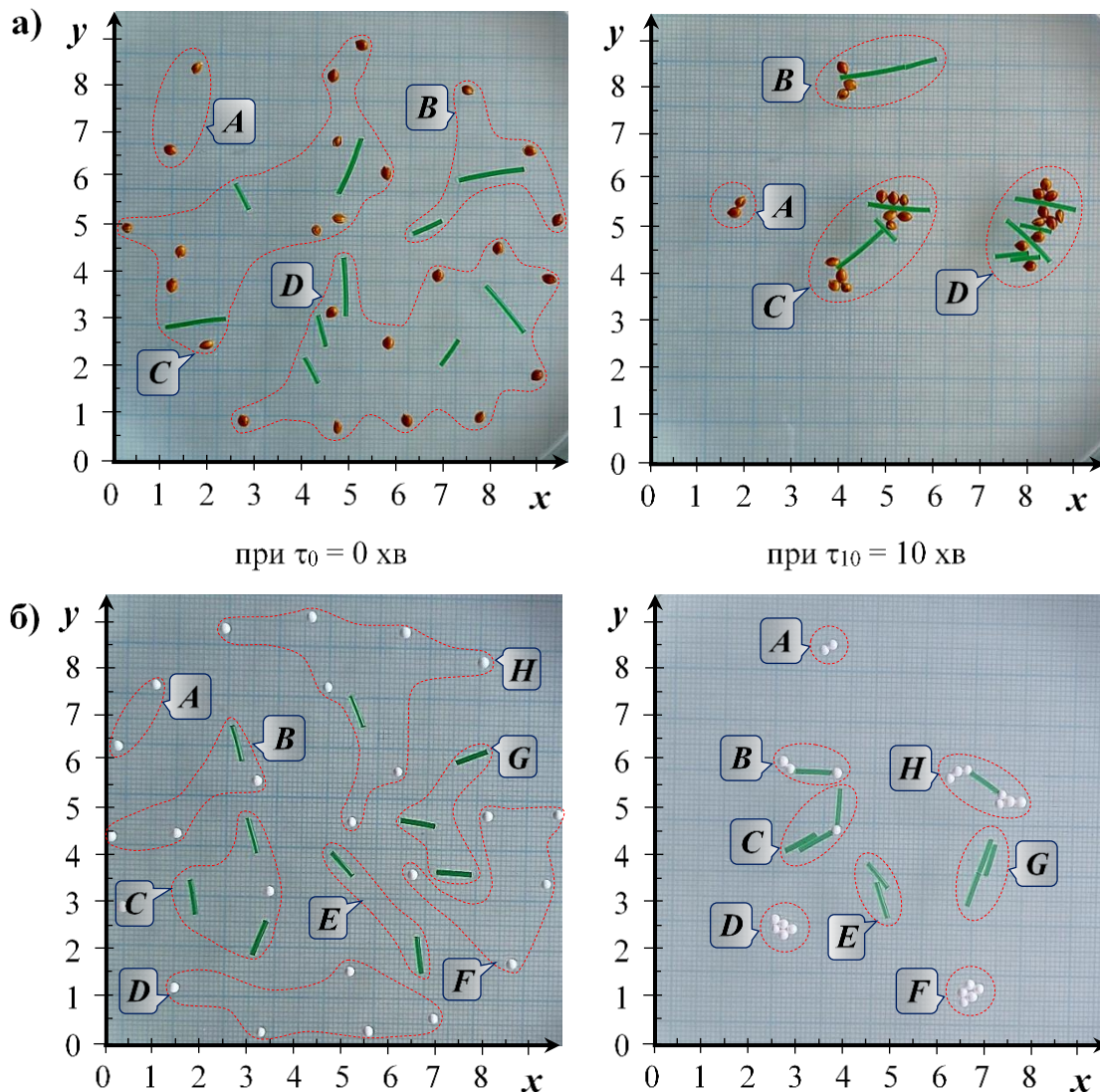


Рис. 1. Моделювання процесу самоорганізації структурних агрегатів впродовж 10 хв: мінеральних (а) й органічних зерен (б) з лінійними частками

лінійних часток з водою, збирання кластерів без прикладання зовнішніх сил відбувається в певному порядку. Одні дисперсні частки можуть покривати поверхні моноволокон із всіх сторін, інші – лише деякі ділянки їх поверхні. Крім цього, з огляду на якісні характеристики та кількісний склад зерен і лінійних часток, армована дисперсна система через τ_{10} складається із структурних агрегатів більш різноманітних за складом, розмірами й будовою у порівнянні з неармованою. Спочатку формуються кластери малі за розміром, а надалі об'єднуючись між собою створюються агрегати більших розмірів, наприклад, «C» і «D» (τ_{10} , рис. 1, а). Разом з цим помічено, що первинні кластери перед зчепленням здійснюють взаємний поворот один відносно одного, намагаючись таким чином контактувати ділянками поверхні часток однієї природи. На додаток елементи одного кластеру здатні добре компонуватися з елементами іншого агрегату, впроваджуючись між собою. В системі утворюються кластери різні за об'ємом й протяжністю, однакові за площею поверхні часток. Водночас виявлено, що групування часток в агрегати не завжди протікає за правилом малої відстані між ними. Лінійні частки, як і дисперсні зерна спроможні «розпізнавати» стан поверхні одна одної та переміщатися до собі подібних. По мірі того як знижується концентрація зерен в системі, фібра (особливо більшої довжини) може компонуватися між собою через активні центри торцевих частин, створюючи таким чином дискретні лінійні агрегати. Здебільшого це спостерігається на модельних системах із присутністю органічних зерен (ОЗ). Причому ОЗ винятково контактують із фіброю через поперечний зріз її сторін (рис. 1, б) і можуть слугувати

ланкою при формуванні видовженого кластера, наприклад, перколяційного. У процесі дослідження теж зафіксовано, що при кластер-кластерній взаємодії можливий перерозподіл агрегатів між собою (τ_{10} , рис. 1, б). Втім із присутністю мінеральних зерен в дисперсній системі, лінійні кластери здатні потовщуватись, збільшуючись в об'ємі. Своєю чергою аналіз модельних систем міжчасткових взаємодій на рис. 1а, і відповідних ним, дозволив встановити, що дискретні волокна можуть виступати активним осередком навколо поверхні яких групуються мінеральні зерна. Організуються більш об'ємні й однорідні за початковим складом часток структурні агрегати, наприклад, фрактальні. До того ж фібра в упорядкованих кластерах може орієнтуватися через зерна симетрично стосовно себе або під різним кутом, який зокрема, можуть теж задавати дисперсні частки при зміні свого положення в агрегатах. При цьому швидкість самоорганізації кластерних підструктур в структурі системи залежить від кількісного складу зерен і волокон. В табл. 1 через пройдений шлях кожної частки впродовж 10 хв визначено середню швидкість структурування кластерів (рис. 1). Проведені дослідження переконують, що лінійні частки не лише можуть змінювати властивості

Таблиця 1 – Середня швидкість (v , мм/хв) упорядкування часток в агрегатах протягом τ_{10}

Номер рисунку	Позначення кластеру							
	«A»	«B»	«C»	«D»	«E»	«F»	«G»	«H»
Рис. 1а	3.66	5.20	3.50	5.41	-	-	-	-
Рис. 1б	3.20	2.42	2.82	3.72	2.01	3.11	1.73	2.82

міжфазної перехідної зони, але й, брати активну участь у створенні дискретних структур різної геометрії й складу, змінюючи таким чином періоди набору структурної міцності дисперсної системи.

В роботі додатково проаналізовано механізм процесу утворення кластерів різної форми. Під час наглядання за рухом зерен і моноволокон котрі знаходяться під перманентним впливом силового поля, виявлено, що частки при переміщенні у просторі постійно змінюють своє положення. Як приклад, на рис. 2 показано, як послідовно самоорганізуються частки в кластери («A» і «B» рис. 1, а; «C» рис. 1, б) впродовж τ_{10} , при початковій фіксації їх положення в центрі вузлами й стрілками через кожні 2 хв. Підтверджується, що характер процесу

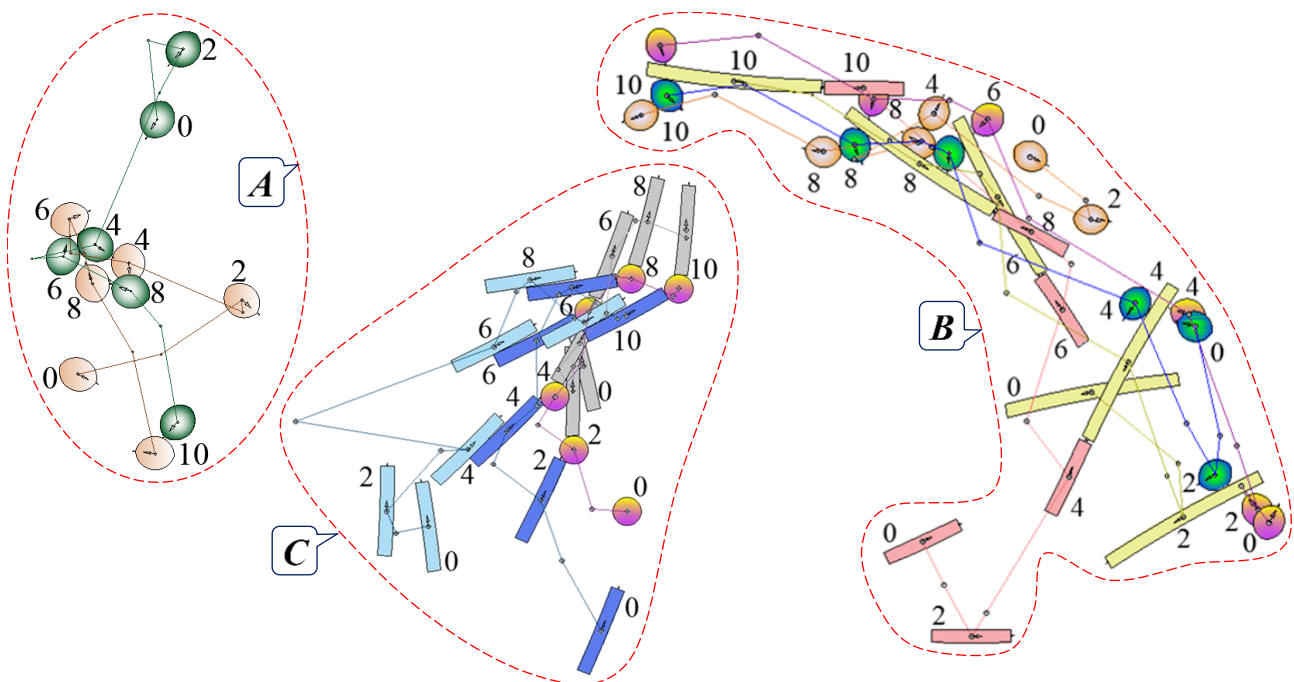


Рис. 2. Поетапний рух часток різної геометрії при вибірковій їх взаємодії з утворенням кластерів різної протяжності

утворення і росту агрегатів різної природи залежить від геометрії дискретних часток та їх співвідношення. Кластери можуть утворюватися в результаті синхронного приєднання з прискоренням зерен до фібри, і навпаки. Однак дисперсні й лінійні частки на поверхні дисперсійного середовища рухаються із різною швидкістю і по різним траєкторіям, складних за видом, змінюючи наразі положення та величину кута початкового просторового орієнтування (τ_0). Слід зауважити, що швидкість руху всіх часток стрімко падає після їх об'єднання чи приєднання до первинно утворених агрегатів (τ_{10} , рис. 1). Надалі відбувається перегрупування часток, в результаті чого формуються структурні агрегати з більш компактним розташуванням їх складових і покращеною силою зчеплення між ними.

Здійснений аналіз моделей міжчасткових взаємодій дає підстави зробити проміжний висновок, що наповнення кластерних структур дискретною арматурою збільшує структурне різноманіття системи. Залежно від співвідношення лінійних часток і дисперсних зерен утворюються кластерні підструктури різної природи, які відрізняються періодами свого формування і властивостями. На нашу думку, різноманітність таких підструктур на мікрорівні бетону дозволить поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Для підтвердження зроблених заключень пропонується на часі провести аналіз результатів досліджень зразків-дисків глини (рис. 3), армованих гідрофільною дискретною арматурою. Проведені дослідження показали, що процес структуроутворення глиняних композицій у повітряно-сухих умовах супроводжується значними усадочними деформаціями, які призводять до появи в об'ємі матеріалу тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, зміни розмірів й об'єму зразків.

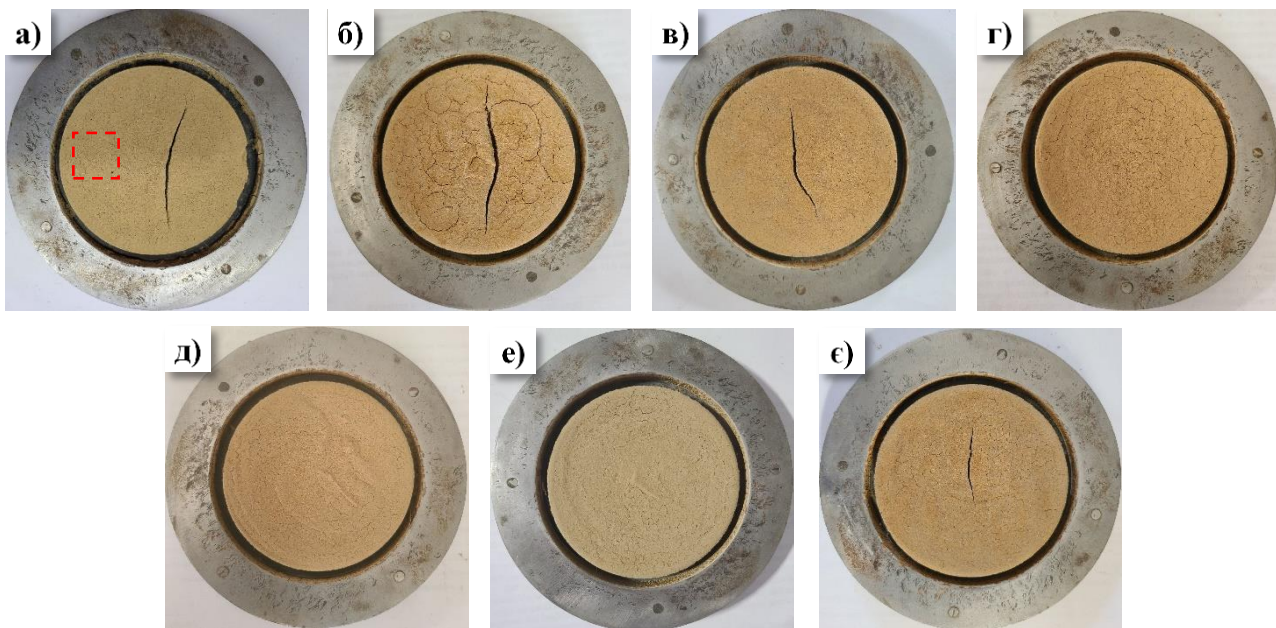


Рис. 3. Зразки різних складів глиняних композицій: без фібри (а); армовані фіброю довжиною 3 мм (б); 6 мм (в); 12 мм (г); 3 і 6 мм (д); 3 і 12 мм (е); 6 і 12 мм (є)

Кількісною мірою прояву усадочних явищ при висиханні зразків глини є величина їх усадки та об'ємної маси. Відносну повітряну усадку ($\epsilon_{в.у}$, %) обчислювали за зміною площі поверхні зразків-дисків $\epsilon_{в.у} = (S_0 - S_1)/S_0$. Аналіз результатів критеріїв показав, що неармований склад (рис. 4 і 5) характеризується найбільшою зміною об'ємної маси (на 34.6%) і величиною усадки (22.4%). Водночас найменші значення цих показників мають склади глини армовані фіброю довжиною 3 і 12 мм. Візуалізація кінетичних кривих об'ємної маси в часі (рис. 4) демонструє, що моделі структур дискретно-армованих композицій #3, #5 і #7 знаходяться в більш напруженому стані в процесі висихання внаслідок більших перепадів вологовмісту протягом 3 діб. Однак, всупереч цьому склади характеризуються меншою пошкодженістю (на $\leq 33.5\%$) порівняно з неармованим складом #1 (рис. 5). В роботі пошкодженість глиняних композицій визначена через коефіцієнт пошкодженості K_D [22], як співвідношення сумарної

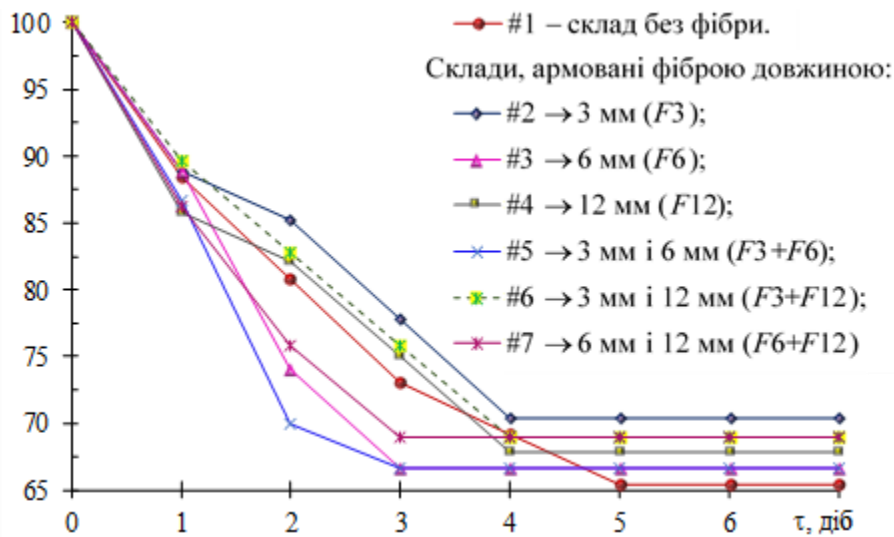
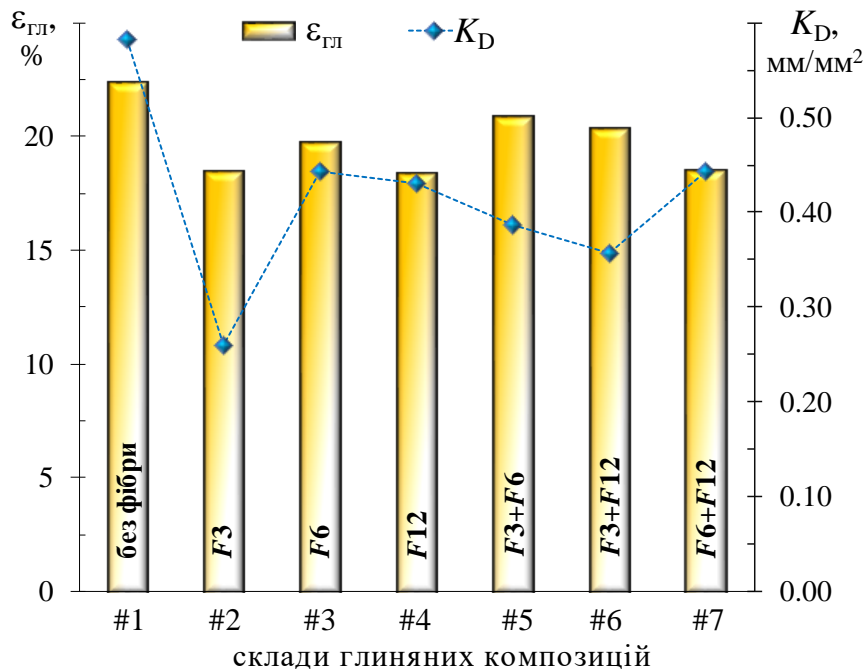


Рис. 4. Кінетика зміни об'ємної маси (%) складів глиняних композицій


 Рис. 5. Аналіз зміни усадки ($\epsilon_{\text{гл}}$) і пошкодженості (K_D) глиняних зразків у віці 7 діб

протяжності тріщин і внутрішніх поверхонь розділу до фіксованої площі поверхні зразка (на рис. 3,а, як приклад, площа поверхні для обчислення K_D позначена штриховою лінією). До того ж на лицьовій поверхні композиції складу #5, який показав дещо більшу величину усадки $\epsilon_{\text{в.у}}$ порівняно з іншими армованими складами глини, не спостерігається утворення макротріщин. Отже, можна стверджувати, що дискретні скловолкна здатні протистояти внутрішнім напруженням шляхом перерозподілу величин усадочних деформацій за перетином (рис. 3) і по поверхні зразків (рис. 6) дисперсної системи. В найбільшій мірі на зниження K_D впливає присутність фібри довжиною 3 мм (склади #2, #5 і #6). Додатково оцінювався коефіцієнт чутливості $K_{\text{ч}}$ глиняних систем до висихання (або тріщиностійкість) [23]. Показник за З.А. Носовою розрахований через об'єм і масу вологих (відформованих) і висушених надалі впродовж 7 днів тих же зразків глини. Аналіз чисельних значень $K_{\text{ч}}$ вказує, що менш чутливими до вилучення вологи є склади в яких присутне дискретне скловолкно. Значення показника більш ніж на 17.4 % нижчий за неармований склад #1. На підставі проведеного дослідження логічно припустити, що структура армованих глиняних композицій пронизана тоншою капілярною сіткою, яка ускладнює переміщення вологи із внутрішньої частини до периферійної й поверхні зразків-дисків під час їх висихання. На початковому етапі

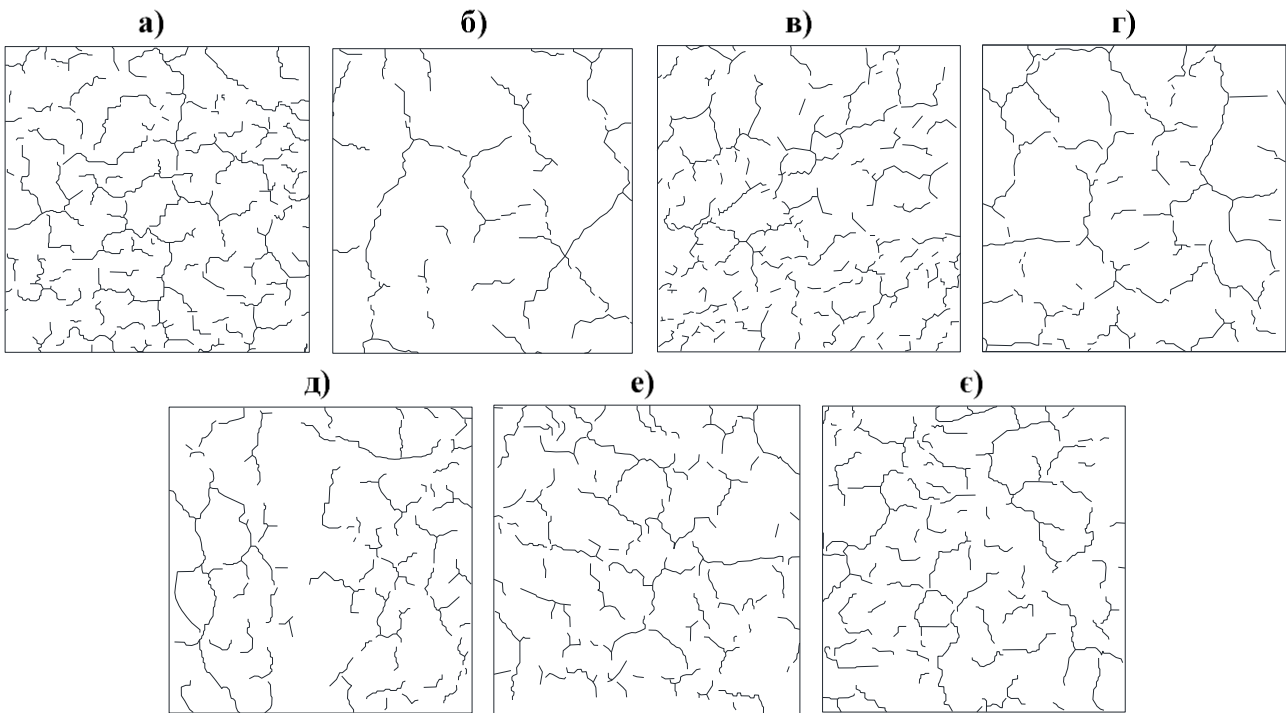


Рис. 6. Тріщини і внутрішні поверхні розділу глиняних зразків: без фібри (а); армовані фіброю довжиною 3 мм (б); 6 мм (в); 12 мм (г); 3 і 6 мм (д); 3 і 12 мм (е); 6 і 12 мм (з)

становлення структури в'язучого з фіброю утворюються кластерні підструктури із щільнішою упаковкою високодисперсних часток глини та з поліпшеними адгезійно-когезійними зв'язками між агрегатами. Візуальний і кількісний аналіз проявлених дефектів на лицьовій поверхні зразків-дисків підтверджує, що сформовані структурні блоки є дещо більшими за розміром (рис. 6, б та з), а інтегральна структура композицій із фіброю характеризуються меншою пошкодженістю K_D (рис. 5). Проте, як відомо, покращення функціональних властивостей армованих композитів значною мірою залежить від ступеня розподілу (або дисперсності) дискретної арматури в об'ємі матеріалу. На наш погляд, розташування дефектів на поверхні глиняних систем повинне хоча б побічно відображати – чи здатні лінійні частки до рівномірного розподілу об'ємних деформацій і диспергування в структурі композитів. З рис. 6, б-з видно, що для ефективного армування структури в'язучих систем необхідно враховувати не лише співрозмірність за діаметром часток дисперсної фази, але й довжину лінійних часток. Найбільш однорідними за ступенем дисперсності моноволокон є склади глини армовані фіброю довжинами 3 і 12 мм. Крім того, ці композиції характеризуються оптимальними рівнями властивостей. У зв'язку з цим в роботі розглянуто кореляційний зв'язок між структурними параметрами глиняних систем. Через коефіцієнт кореляції r , встановлено тісний взаємозв'язок між критеріями $r\{K_{\text{ч}}; \varepsilon_{\text{в.у}}\} = 0.85$, $r\{K_{\text{ч}}; \rho_{\text{гл}}\} = -0.86$, $r\{K_{\text{ч}}; K_D\} = 0.73$, що підтверджує правдивість отриманих результатів.

Отримані результати на фізичних моделях глини дозволили перекоонатися, що дискретні моноволокна здатні активно брати участь в організації структурних агрегатів різної природи. Здійснений аналіз властивостей різних складів глиняної композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Дослідження дисперсних систем показали, що величина об'ємних деформацій визначається початковим складом глини. В нашому випадку – це якісним складом лінійних часток різної довжини стосовно неармованого складу глини. Використання фібри оптимальної геометрії в глиняних композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю дефектів (підтверджується коефіцієнтом пошкодженості, величиною усадки тощо). З огляду на отримані результати можна вважати, що характер розподілу деформацій в структурі матеріалу є різним.

Для неспростовного доказу того, що лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу деформацій, на прикладі виготовлених фізичних моделей розглянуто розподіл залишкових технологічних напружень (деформацій) в оптично-чутливому полімері. В роботі до залишкових віднесено такі деформації, які виникли й розвивалися на рівні зразка-диска під час реакції поліконденсації та отвердіння епоксидного композиту. Застосування оптично-прозорого полімеру дозволяє оцінити напружено-деформований стан зразка дискретно-армованого композиту. Розподілення деформацій або наявність технологічних напружень в структурі моделей виявлено методом фотопружності під час просвічування зразків-дисків (рис. 7) поляризованим світлом [24]. При цьому, інтерференційні картини світлових хвиль (або картини смуг чи ізохром), що виходять із досліджуваних зразків композиту, отримані за допомогою фотопристрою при однакових кутах нахилу і відстанях розташування поляроїда й аналізатора між собою, та відповідно зразка між ними.

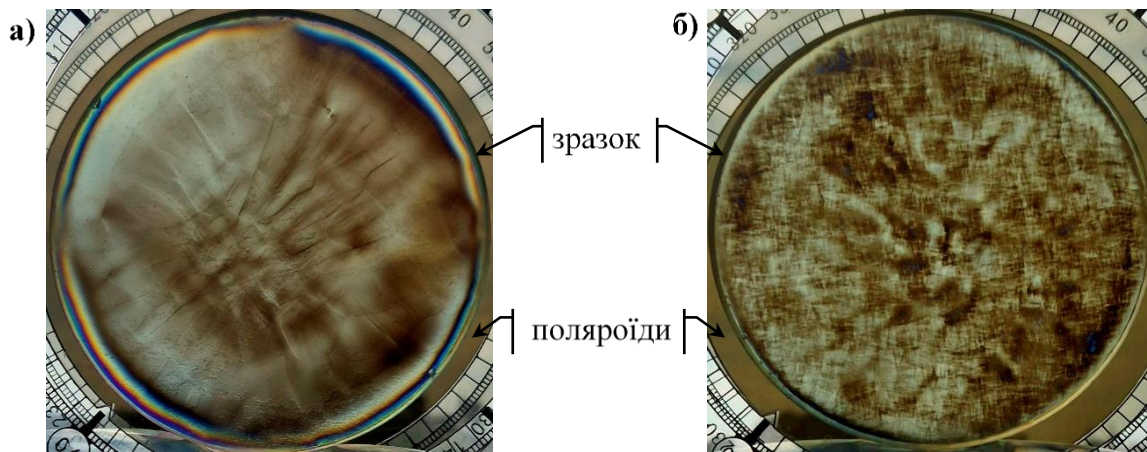


Рис. 7. Характер розподілу залишкових деформацій в структурі неармованої (а) та армованої фіброю (б) полімерних систем

Візуальний аналіз картин смуг (рис. 7) двох моделей демонструє, що неармований склад порівняно з армованим характеризується дещо більшим градієнтом нерівномірності полів напружень в об'ємі композиту. При тому барвисті смуги інтенсивних напружень максимально проявляються в поверхневих шарах матеріалу, на гранях по периметру зразка без фібри (рис. 7, а). Через це можна вважати, що периферійні шари неармованого зразка матеріалу є найбільш піддатливими до початкового утворення в них дефектів. Своєю чергою незброєним оком видно, що в структурі дискретно-армованого зразка (рис. 7, б) спостерігається відносно однорідна картина перерозподілення залишкових полів напружень. Наявність фібри змінює характер розподілу об'ємних деформацій, що виникають при твердінні зв'язуючого, та забезпечує через хорошу дисперсність в структурі композиту більш рівномірне розсіювання внутрішньої енергії в'язучої системи в об'ємі зразка, запобігаючи тим самим передчасному утворенню технологічних дефектів. Це підтверджує здатність дискретних волокон приймати участь в процесах структуроутворення будівельних композитів.

Висновок. Застосування різних фізичних моделей дисперсних систем дозволило показати активну участь дискретної арматури в процесах структуроутворення дисперсних композитів. Наповнення кластерних структур лінійними частками збільшує структурне різноманіття дисперсної системи. Аналіз властивостей різних складів армованої композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Використання фібри певної геометрії забезпечує отримання структур композитів із меншою кількістю дефектів, адже лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу об'ємних деформацій. В наступній публікації планується представити аналіз експериментальних досліджень властивостей цементного каменю, наповненого органо-мінеральними добавками різної природи.

Література

1. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. Интенсивная технология бетонов. Москва: Стройиздат, 1989. 264с.
2. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Київ: Будівельник, 1991. 144с.
3. Суханов В.Г., Вировой В.М., Коробко О.А. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412с.
4. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханова С.С., Суханов В.Г. Наукові дослідження: основи методології. Одеса: ОДАБА, 2024. 148с.
5. Garboczi E.J., Bentz D.P. Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete. *Journal of Materials Research*. 1991. vol. 6. no. 1, pp. 196-201.
6. Ramachandran V.S., Beaudoin James J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
7. Mehta P., Paulo J. M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3th edition. McGraw Hill Professional, 2006.
8. Дворкин Л.И., Соломатов В.Н., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Киев: Будівельник, 1991.
9. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А.В. Ушерова-Маршака. Харьков: Колорит, 2005. 280с.
10. Rixom M.R., Mailvaganam Noel P. *Chemical admixtures for concrete*. 3th edition. Taylor & Francis e-Library, 2001.
11. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів: навчальний посібник. Ніжин: ТОВ «Видавництво «АспектПоліграф», 2010. 228с.
12. Пушкарьова К.К., Гончар О.А., Мазур В.О. Особливості структуроутворення білого портландцементу в присутності карбонатних добавок *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. С. 57-69.
13. Bentur A., Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2007.
14. Brand A.M. *Cement-Based Composites: Materials, mechanical properties and performance*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2009.
15. Lee S.F., Jacobsen S. Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 2011. vol. 44. pp. 1451-1465.
16. Bantia N., Majdzadeh F., Wu J., Bindiganavile V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement & Concrete Composites*, 2014. vol. 48, pp. 91-97.
17. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. vol. 708. pp. 1-7
18. Maso J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
19. Chung D.D.L. Dispersion of Short Fibers in Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005. pp. 379-383.
20. Katz A., Bentur A. Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of carbon fiber reinforced cement. *Advanced Cement Based Materials*, 1996. vol. 3, pp. 1-13.
21. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M. Structure formation of dispersed-reinforced building composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 85, pp. 71-78.
22. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса: Город мастеров, 1998. 168с.
23. Юшкевич М.О., Роговой М.И. Технология керамики. Москва: Стройиздат, 1969. 350с.

24. Стрижало В.О., Бородій М.В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 306с.

References

- [1] V.Y. Solomatov, M.K. Takhyrov, Md. Takher Shakh, *Yntensyvnaia tekhnolohyia betonov*. Moskva: Stroiyzdat, 1989. 264s.
- [2] V.Y. Solomatov, V.N. Выговой, V.S. Dorofeev, A.V. Syrenko, *Компрозытуопные стroytelные материалы у конструктыу понyзhenной материалоemкости*. Kiev: Budivelnyk, 1991.
- [3] V.H. Sukhanov, V.M. Vyrovoy, O.A. Korobko, *Struktura materiala v strukturi konstruksii: monohrafiia*. Odesa: ODABA, 2022.
- [4] V.M. Vyrovoy, O.O. Korobko, S.S. Sukhanova, V.H. Sukhanov, *Naukovi doslidzhennia: osnovy metodolohii*. Odesa: ODABA, 2024.
- [5] E.J. Garboczi, D.P. Bentz, "Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete", *Journal of Materials Research*, vol. 6. no. 1, pp. 196-201, 1991.
- [6] V.S. Ramachandran, James J. Beaudoin, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
- [7] P. Mehta, J. M. Monteiro Paulo, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3th edition. McGraw Hill Professional, 2006.
- [8] L.Y. Dvorkyn, V.N. Solomatov, V.N. Выговой, S.M. Chudnovskiy Тseментные бетоны с минералнымy napolnyteliamy. Kyev: Будывєльник, 1991.
- [9] A.V. Usherova-Marshaka, *Khymycheskye y myneralnue dobavky v beton*. Kharkov: Koloryt, 2005.
- [10] M.R. Rixom, Noel P. Mailvaganam, *Chemical admixtures for concrete*. 3th edition. Taylor & Francis e-Library, 2001.
- [11] V.V. Troian, *Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv: navchalnyi posibnyk*. Nizhyn: TOV «Vydavnytstvo «AspektPolihraf», 2010.
- [12] K.K. Pushkarova, O.A. Honchar, V.O. Mazur, "Osoblyvosti strukturoutvorennia biloho portlandtseментu v prysutnosti karbonatnykh dobavok", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, pp. 57-69, 2023.
- [13] A. Bentur, S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2007.
- [14] A.M. Brand *Cement-Based Composites: Materials, mechanical properties and performance*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2009.
- [15] S.F. Lee, S. Jacobsen, "Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar", *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 1451-1465, 2011.
- [16] N. Banthia, F. Majdazadeh, J. Wu, V. Bindiganavile, "Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear", *Cement & Concrete Composites*, vol. 48, pp. 91-97, 2014.
- [17] A.D. Dovgan, V.M. Vyrovoy, P.M. Dovgan, "Crack resistance of decorative composites", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 708, pp. 1-7, 2019.
- [18] J.C. Maso, *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
- [19] D.D.L. Chung, "Dispersion of Short Fibers in Cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 379-383, 2005.
- [20] A. Katz, A. Bentur, "Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of carbon fiber reinforced cement", *Advanced Cement Based Materials*, vol. 3, pp. 1-13, 1996.

- [21] A.D. Dovgan, V.M. Vyrovoy, "Structure formation of dispersed-reinforced building composites", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 85, pp. 71-78, 2021.
- [22] V.S. Dorofeev, V.N. Vyrovoy, *Tekhnolohycheskaia povrezhdennost stroitelnykh materiyalov y konstruktsyi*. Odessa: Horod masterov, 1998.
- [23] M.O. Yushkevych, M.Y. Rohovoi, *Tekhnolohyia keramyky*. Moskva: Stroiyzdat, 1969.
- [24] V.O. Stryzhalo, M.V. Borodii, *Eksperymentalni metody v mekhanitsi deformivnoho tverdoho tila*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022.

ROLE OF DISCRETE REINFORCEMENT IN THE ORGANIZATION OF THE MICROSTRUCTURE OF DECORATIVE COMPOSITES

¹**Dovgan O.D.**, PhD, Associate Professor,
aleks.dovhan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6140-3159

¹**Vyrovoy V.M.**, D.Sc., Professor,
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

¹**Dovgan P.M.**, PhD,
dovganpm@gmail.com, ORCID: 0009-0002-3603-7617

¹**Makarova S.V.**, PhD, Associate Professor,
svetlana.makarova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3237-1431

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikhson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article proposes to consider decorative materials and products in the form of open difficult organized systems that interact with the environment permanently and react to the totality of external influences. It is proposed to apply a multi-level discrete reinforcement of material structures of products in order to maintain functional properties at a given level. Discrete reinforcement as an initial component is able to participate in the processes of structure formation at all levels of structural heterogeneity of decorative composite. A mechanism of microstructure organization of dispersed-reinforced material was studied on various models of different dispersed systems. Experimental studies were conducted in several stages. At the first stage, models of physical interaction of particles of dispersed phase on the surface of the dispersion model were used. At the second stage, physical models of clay-water and polymer-containing systems were used to assess the degree of fiber dispersion and analyze the kinetics of cluster substructures formation of a microstructure of reinforced composites.

The analysis of models of interparticle interactions made it possible to identify that a filling of cluster structures with discrete reinforcement increases a structural diversity of the system. Cluster substructures of different nature are formed depending on the ratio of linear particles and dispersed grains. Analysis of the properties of different compositions of the clay composition proves that the diversity of cluster substructures provides an opportunity to improve structural parameters of the dispersed system. Studies have shown that a value of volumetric deformations is determined by the initial composition of the clay. The use of fiber of an optimal geometry in the compositions provides structures with significantly fewer defects. The distribution of residual stresses and deformations in an optically sensitive polymer is considered on the example of manufactured physical models, providing an irrefutable proof that linear particles are capable of perception and redistribution of deformations. Visual analysis isochrome of polymer samples demonstrated that the presence of fiber in the composite changes the nature of distribution of volumetric deformations.

Keywords: decorative composite, structure, fiber, dispersed system, cluster, deformations.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2024