

УДК 691-024

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.45.832

ВПЛИВ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ НА СТРУКТУРУ КОНГЛОМЕРАТИВ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

МАЦЕВИЧ І. М.¹, канд. техн. наук, доц.,
КОЛОХОВ В. В.², канд. техн. наук, доц.,
МОСЬПАН В. І.³, канд. техн. наук, доц.,
КРОЛЬ Р. М.^{4*}, канд. техн. наук, доц.,
ТИМОШЕНКО О. А.⁵, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-73, e-mail: ig.maz2012@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4659-6471

² Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: vykolokhov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2314-1477

³ Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: vovamospan@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

^{4*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-73, e-mail: krol.roman2012@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Анотація. Постановка проблеми. Процес ущільнення сумішей будівельних виробів, які формуються або відформовані, – важливий етап утворення макроструктури, оскільки в цей період у середовищі в'язкої речовини порівняно стійко фіксуються зернисті й інші компоненти композиту, які його заповнюють. Велика кількість публікацій присвячена вивченню цього питання, проте багато аспектів впливу процесу ущільнення на структуру конгломерату ще не відомі, отримані результати не систематизовані. **Вступ.** Попереднє ущільнення суміші зменшує роз'єднаність частинок, переводячи зв'язки з точкових у міжфазні по межах контакту. З наближенням частинок на дуже малі відстані виникають і зростають сили відштовхування. В кінцевому рахунку діє результуюча сила, яка за деякої оптимальної відстані частинок одна від іншої забезпечує початкову зв'язність сирцю виробу. Фіксація відбувається як безпосереднім примиканням компонентів, у тому числі з можливістю зрощення (наприклад, кристалів), так і через прошарки повністю отверділої або поступово тверднучої в'язучої речовини. В конгломератних матеріалах більш типовий контакт через прошарки на стадії ущільнення, ніж безпосереднє контактування або зрощення частинок за впливу поверхневої енергії, хімічних зв'язків або інших, у тому числі комплексних, факторів. **Мета роботи** – встановлення особливостей у формуванні структури конгломерату від попереднього ущільнення суміші, а також його впливу на функціональні і технологічні характеристики. **Методи.** Розв'язання задачі оптимальної структури конгломерату вимагає виявлення залежності між видом, концентрацією, складом сировини, способом ущільнення і одержуваними функціональними характеристиками виробу. **Результати.** Оптимізація структури за одночасного забезпечення рівня заданих властивостей відповідає досягненню найвищої якості в матеріалі або виробі. Технологія за цим критерієм стає прогресивною. Для зменшення водопоглинання цементних бетонів необхідно забезпечувати оптимальні умови гідратації цементу та створення щільного конгломерату з мінімальною кількістю пор. У зв'язку з актуальністю створення будівельних матеріалів та виробів із матеріалів навколишнього середовища будівництва (грунтоблоків) та зменшення енергомісткості під час формування та пресування слід продовжити розробки технологій та конструкцій обладнання для отримання оптимальної структури конгломерату з мінімальним водопоглинанням. **Висновок.** Дослідження впливу ущільнення сировини на структуру конгломератів тривають, але вже ці отримані результати свідчать, що швидкість і форма утворення конгломерату істотно змінюються за оптимальних значень попередньо ущільненої сировини.

Ключові слова: ущільнення сировини; штучні будівельні конгломерати; структура; мікроструктура; мезоструктура; макроструктура

EFFECT OF THE COMPACTION PROCESS ON THE CONGLOMERATE STRUCTURE AT PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS

MATSEVYCH I.M.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOLOKHOV V.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MOSPAN V.I.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KROL' R.M.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Construction and Transportation Engineering, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-73, e-mail: ig.maz2012@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4659-6471

² Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76; e-mail: vykolokhov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2314-1477

³ Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: vovamospan@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

^{4*} Department of Building and Travelling of Machines, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (099) 207-87-00, e-mail: krol.roman2012@gmail.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

⁵ Department of Ecology and Environmental Protection, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Abstract. Formulation of the problem. The process of densification of mixtures of construction products that are being formed or molded is an important stage in the formation of a macrostructure, since during this period, granular and other components of the composite that fill it are relatively firmly fixed in a viscous medium. A large number of publications are devoted to the study of this issue, but many aspects of the effect of compaction on the structure of a conglomerate are not yet known, and the results obtained have not been systematized. **Introduction.** Preliminary compaction of the mixture reduces the fragmentation of particles, transferring bonds from point to interfacial along the contact boundaries. With the approach of particles to very small distances, repulsive forces arise and increase. Ultimately, the resultant force acts, which, at a certain optimal distance of particles from one another, provides the initial cohesion of the raw product. Fixation occurs both directly by adjoining the components, including with the possibility of intergrowth (for example, crystals), and through interlayers of a completely hardened or gradually hardening binder. In conglomerate materials, contact through interlayers at the compaction stage is more typical than direct contact or coalescence of particles under the influence of surface energy, chemical bonds, or other, including complex, factors. **Objective.** The aim of the work was to establish the features in the formation of the structure of the conglomerate from the preliminary compaction of the mixture, as well as its influence on the functional and technological characteristics. **Methods.** Solving the problem of the optimal structure of a conglomerate requires identifying the relationship between the type, concentration, composition of raw materials, the method of compaction and the resulting functional characteristics of the product. **Results.** Optimization of the structure while maintaining the level of desired properties corresponds to achieving the highest quality in a material or product. Technology by this criterion becomes progressive. To reduce the water penetration of cement concretes, it is necessary to provide optimal conditions for cement hydration and the creation of a dense conglomerate with a minimum number of pores. In connection with the relevance of creating building materials and products from materials of the construction environment (soil blocks) and reducing energy consumption during molding and pressing, it is necessary to continue the development of technologies and equipment designs to obtain the optimal conglomerate structure with minimal water penetration. **Conclusion.** Studies of the effect of compaction of raw materials on the structure of conglomerates are ongoing, but already these results indicate that the rate and form of conglomerate formation change significantly at optimal values of pre-compacted raw materials.

Keywords : *compaction of raw materials; artificial building conglomerates; structure; microstructure; meso-structure; macrostructure*

У процесі виготовлення будівельних матеріалів і виробів сировина піддається комплексу механічних, хімічних, фізико-хімічних теплових та ін. впливів. У результаті реалізації та певної

послідовності цих технологічних впливів сировина або змінює тільки форму і розмір частинок речовини, отримує більшу однорідність і очищається від забруднення, або зазнає значних змін складу, внутрішньої

структури і якісних характеристик [1].

Штучні будівельні конгломерати (ШБК) – будівельні матеріали, в яких заповнювач зцементований в моноліт [2]. Елементи структури ШБК такі:

- заповнювальна частина;
- в'язуча частина – матриця;
- пори і капіляри;
- контактний шар на межі матриця – заповнювач.

Під структурою ШБК будемо розуміти будову матеріалу на різних рівнях – від атомно-молекулярного до макроструктури. Зазвичай структуру ШБК розглядають на трьох рівнях: макро-, мезо- та мікроструктура.

Залежно від концентрації заповнювальної частини ШБК штучні будівельні конгломерати класифікуються на такі види мезо- і макроструктури:

- плавуча (відсутні контакти між заповнювачами);
- контактна;
- крупнопориста – обсяг матриці менший обсягу порожнин між заповнювачами.

Кожен різновид будівельних матеріалів і виробів потребує специфічної технології, яка виражається своїм регламентом, параметрами режимів, мінімальним обсягом витраченої енергії і сировинних ресурсів, досягненням економічно ефективних результатів і високими показниками якості готової продукції.

За великої різноманітності специфічних технологій матеріалів і виробів вони містять і низку типових операцій (переробок). Це пов'язано з тим, що в їх основі лежать однакові фізичні або фізико-хімічні залежності, подібні кінематичні схеми дії обладнання і машинного парку, загальні методи використання теплової або іншої енергії тощо. До типових переробок, які зумовлюють процеси структуроутворення у матеріалів та виробів, належать :

- підготовчі роботи;
- змішування від дозованих сировинних компонентів;
- формування одержуваної суміші (маси) й ущільнення відформованих

виробів;

- спеціальна обробка ущільнених виробів до повного їх затвердіння;
- технічний контроль якості готової продукції;
- контроль за кондицією технологічного регламенту;
- транспортування сировини і змішаних сумішей (маси);
- переміщення готових виробів;
- складування сировини і виготовленої продукції (напівфабрикату або фабрикату);
- зберігання матеріалів на складах.

Для ущільнення порошкоподібних та дрібних сипких матеріалів та сумішей виділяють шість найпоширеніших способів формування та ущільнення : вібраційне, за допомогою закритої прес-форми, за допомогою наконечника, ізостатичне, імпульсне, прокатне [3; 4]. Найпоширеніший і найпопулярніший вид ущільнення порошкоподібних та дрібних сипких матеріалів – гранулювання.

Розсипна сировина складається із двох фаз : твердої, що містить деяку кількість вологи, і газоподібної, яка заповнює простір між частинками. Кількісне співвідношення цих фаз до і після пресування на грануляторах змінюється. Ефективність процесу гранулювання залежить від механізму утворення гранул, який, у свою чергу, визначається способом гранулювання. У зв'язку з цим методи гранулювання сипких матеріалів доцільно класифікувати таким чином :

- скочення (формування гранул у процесі їх агрегації або пошарового росту з подальшим ущільненням структури);
- пресування сухих порошоків (отримання брикетів, плиток тощо з подальшим їх подрібненням на гранули необхідного розміру);
- формування або екструзія (продавлювання в'язкої або пастоподібної маси через отвори).

Гранулювання методом скочування полягає в попередньому утворенні агрегатів із рівномірно змочених частинок або в нашаруванні сухих частинок на змочені ядра – центри утворення гранул. Цей процес

зумовлений дією капілярно-адсорбційних сил зчеплення між частинками і подальшим ущільненням структури, викликаним силами взаємодії між частинками в щільному динамічному шарі, наприклад, у грануляторах барабанного або тарілчастого типів.

Гранулювання методом пресування сухих порошків, тобто ущільнення за дії зовнішніх сил, засноване на формуванні щільної структури речовини, що зумовлено виникненням міцних когезійних зв'язків між частинками за їх стиснення. Отриманий в результаті ущільнення брикет (плитка, стрічка) подрібнюють і спрямовують на розсівання для відбору кондиційної фракції гранул, що являють собою готовий продукт.

Гранулювання методом формування або екструзії полягає в продавлюванні пастоподібної маси, що являє собою або зволожену шихту, або суміш порошку з легкоплавким компонентом, через перфоровані пристосування з подальшим сушінням гранул або їх охолодженням.

На частинки сипких матеріалів при створенні та формуванні гранул можуть впливати такі сили: капілярні і поверхнево-активні сили на межі розділу твердої і рідкої фаз; адгезійні сили, що виникають в адсорбованих шарах; сили тяжіння між твердими частинками (молекулярні сили Ван-дер-Ваальса та сили електростатичного притягання); сили зв'язків, зумовлені утворенням матеріальних містків, які виникають під час спікання, хімічної реакції, затвердіння сполучного компонента, плавлення і кристалізації розчиненої речовини під час сушіння.

За гранулювання методом скочування більш результативними стають зв'язки між частинками, зумовлені капілярними силами, що пояснюється використанням рідкофазного сполучного та утворенням кристалічних містків.

Ущільнення виробів, які формуються або відформовані, – важливий етап утворення макроструктури, оскільки в цей період у середовищі в'язкої речовини порівняно стійко фіксуються зернисті й інші компоненти композиту, які його

заповнюють.

Свіжовиготовлена суміш (маса) володіє певною зручнооброблюваністю, що виражається в її реальній здатності сприймати технологічні операції з формування та ущільнення виробів.

Суміші з вельми малою в'язкістю (літі) практично не потребують ущільнення під час формування виробів або покриттів, що становить значну технологічну зручність. Для відтворення литтєвої технології в суміш вводять нерідко відповідні пластифікатори або навіть суперпластифікатори. Введені навіть у малих кількостях, вони сприяють різкому зниженню в'язкості суміші, полегшуючи формування виробів і в тому випадку, коли їх обриси відрізняються підвищеною складністю. Тієї ж мети досягають додатковим збільшенням кількості рідинного середовища в суміші (масі), що повинно бути кожний раз обґрунтовано із загальних позицій оптимізації структури і вимог до конкретних видів оптимальних структур.

Вироби з пластичних мас оцінюються методами реології. Основними параметрами пластичності служать:

- в'язкість найбільшої незруйнованої структури (η_0);
 - структурна в'язкість (η);
 - в'язкість найменша за повністю зруйнованої структури (η_m). Тому $\eta_0 > \eta > \eta_m$;
 - межа плинності p_k ;
 - умовна статична межа плинності p_{k1} ;
 - умовна динамічна межа плинності p_{k2}
- (рис. 1).

Є й інші характеристики реологічних властивостей маси в її пластичному стані – миттєвий модуль пружності, еластичний модуль пружності, період релаксації та ін. Комплекс таких характеристик дозволяє встановлювати величину допустимих напружень у процесі формування і ущільнення. Наприклад, необхідно, щоб напруга зсуву в масі не перевищила p_{k2} , за якої ще відсутня повна руйнація структури, тому що це спричинить у стрічковому пресі розрив стрічки маси, що в разі пластичної глини дасть дефект у структурі,

позбавляючи її оптимальності за цим критерієм.

У разі використання сумішей з підвищеною в'язкістю, які володіють на реологічній кривій умовною динамічною межею плинності і граничним напруженням зсуву, важливо не допустити під час формування напружень, які здатні зруйнувати суцільність виробу. Так, наприклад, у деяких випадках відмічається утворення дефектів структури (звилів), якщо допустити напруження в масі, яке перевищує P_{K_2} (рис. 1).

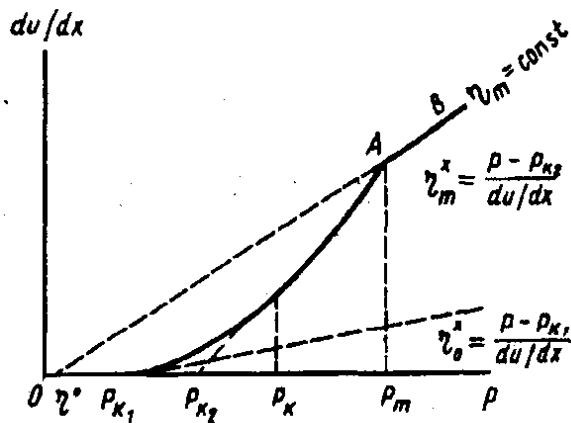


Рис. 1. Реологічна крива, або крива течії в системі координат «напряга (P) зсуву – градієнт швидкості (du/dx) деформації»

Досвід показує, що для сумішей, які добре формуються, значення відношення P_{K_1}/η повинно бути не нижче $2 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$. Конкретні і точні межі реологічних характеристик залежать від різновиду суміші і технологічного засобу формування – пластичного, вібраційного без привантажувача або з привантажувачем і т. п.

Найбільшого значення щільності прагнуть отримати ще на стадії підготовки сировини – порошоків, суспензій, грубозернистих сумішей та інших формувальних систем, особливо у виробництві випалювальних ШБК. Попереднє ущільнення суміші зменшує роз'єднаність частинок, переводячи зв'язки з точкових у міжфазні по межах контакту.

Залежно від різновиду суміші (маси) формування відбувається з використанням укладальників, пресів (наприклад,

стрічкових), екструдерів, каландрів й інших машин. Вибір оптимального способу формування і ущільнення залежить від характеру вихідної сировини і масовості виробництва, потрібних властивостей і виду виробу. Але за всіх способів важливо забезпечити зв'язність і початкову міцність виробів із наступним зміцненням їх на інших стадіях обробки. Початкова зв'язність виникає за впливу молекулярних (Ван-дер-Ваальса) сил. Вони мають електричну природу і здатні розвивати тяжіння частинок при їх зближенні. Силу взаємодії двох частинок (умовно приймаємо їх сферичними) розраховують за формулою:

$$P = 4\pi \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \sigma,$$

де r_1 і r_2 – відповідно радіуси двох сусідніх частинок; σ – поверхнева енергія на межі розділу фаз.

З наближенням частинок на дуже малі відстані виникають і зростають сили відштовхування. В кінцевому рахунку діє результуюча сила, яка за деякої оптимальної відстані частинок одна від іншої забезпечує початкову зв'язність сирцю виробу.

Фіксація може відбуватися як безпосереднім примиканням компонентів, у тому числі з можливістю зрощення (наприклад, кристалів), так і через прошарки повністю отверділої або поступово тверднучої в'язучої речовини. Контакт через прошарки на стадії ущільнення більш типовий в конгломератних матеріалах, ніж безпосереднє контактування або зрощення частинок за впливу поверхневої енергії, хімічних зв'язків або інших, у тому числі комплексних, факторів.

Унаслідок зближення частинок суміші (маси) відбувається розподіл і вирівнювання молекулярного силового поля, тепло- і масообмін, зокрема, міграція середовища в зони менших напружень. Об'єм суміші (маси) як під час ущільнення, так і після нього зменшується, а полідисперсна система поступово переходить у стан відносно стійкої рівноваги за заданої умови формування виробів. Залежно від зручності обробляння готової суміші (маси) можливі і

деякі специфічні особливості формування макроструктури ШБК.

Активний розвиток у перші 28 діб (особливо в початковий термін твердіння) процесів гідратації цементу, формування і становлення структури (пористості) цементного каменю сприяє переходу значної частини води замішування в хіміко-фізичний зв'язаний стан [5]. У результаті взаємодії клінкерних мінералів із водою формуються новоутворення (конгломерати у вигляді кристалогідратів силікатів, алюмінатів, феритів), які займають дещо менший обсяг, ніж початковий сумарний обсяг системи : «цемент + вода + затиснене повітря».

У результаті одночасно із цим утворюється пористість відкрита, сполучена (контракційна, капілярна), яка здатна заповнитися водою, тому що має певний потенціал «капілярного підсосу», і гідрофільністю твердої фази (стінок капілярів, які формуються). Цей ефект посилюється в повітряно-сухих умовах тверднення цементного каменю і бетону в цілому за рахунок, з одного боку, випаровування частини води замішування, а з іншого – через гальмування в силу цього реакцій гідратації цементу (за 28 діб ступінь гідратації $\alpha \sim 55...60\%$).

У результаті зростає відкрита пористість, що відбивається в зростанні кількості води, яка поглинається бетоном, і величиною водопоглинання. Очевидно, що зниження якості ущільнення бетону як дрібнозернистого, так і того, що містить великий заповнювач, за відповідного зростання його капілярної пористості супроводжується підвищенням проникності, зростанням кількості води, яка ним поглинається.

За ущільнення малорухомих і жорстких сумішей, які містять, як правило, знижену кількість в'язучої речовини або зменшену кількість рідкого середовища в ній, витрачається значно більша робота, ніж за ущільнення пластичних, рухомих або литих сумішей (мас). Різними прийомами доводиться примусово зближувати полідисперсні зерна, витісняючи частину

в'язучої речовини в міжзернові пори та порожнини або в пори і пази зерен заповнювача. Більша частина заповнювача в об'ємі моноліту контактує через тонкі або найтонші прошарки в'язучої речовини. У разі недостатньої кількості в'язучої речовини прошарки стають дискретними, що збільшує пористість і зміст повітря (або іншої газової фази) в ШБК.

У випалювальних конгломератах поширені способи напівсухого гідростатичного пресування, віброформування, а також гарячого пресування.

Для досягнення необхідної щільності застосовують різні способи зниження реологічного опору суміші, яка формується :

- введення поверхнево-активних речовин, пластифікаторів і суперпластифікаторів;
- попередній нагрів;
- вібраційний вплив;
- вакуумування та ін.

За особливо інтенсивного ущільнення доцільно підвищити реологічний опір до максимуму. За оптимальної технології кожній консистенції суміші (маси) відповідають певні параметри механічного ущільнення. Кожному способу і кожній інтенсивності механічного ущільнення також відповідає своя певна консистенція, і тоді розміщення частинок твердої фази в результаті ущільнення суміші стає компактним.

У багатьох технологіях формування і ущільнення суміші поєднуються в одну операцію, в результаті чого хімічні і фізико-хімічні процеси, які забезпечують структуроутворення на мікро- та макрорівнях, відбуваються також одночасно. До них відносять :

- тиксотропне розрідження і зміцнення;
- масо- та теплообмін;
- переміщення заповнювальної і в'язкої частин відносно одна одної з утворенням щільної структури до кінця виконання такої поєднаної операції.

Природно, що в цей період не припиняються (хоча й уповільнюються) головні структуротвірні процеси – сорбційні, розчинення та інші, які подібно

до того, як це було на стадії перемішування суміші, завершуються виникненням нових з'єднань і фаз, хоча і в порівняно обмежених кількостях. Набагато вбільших розмірах вони виділяються на наступних стадіях технології, наприклад під час теплової обробки відформованих і ущільнених виробів.

У деяких технологіях використовується переривчасте, ступеневе ущільнення, наприклад, з інтервалом часу між двома вібраціями або пресуваннями.

Повторне ущільнення сприяє ніби вторинному – пластичному деформуванню конгломерату з віджиманням середовища з його мікро- і макропор, а в кінцевому підсумку – додатковому ущільненню в умовах, коли кількість в'язкої речовини продовжує залишатися в межах допустимих відхилень від рекомендованого.

Повторне ущільнення, особливо за вібраційних способів формування, сприяє релаксації напружень, що виникають під час структуроутворення, зменшує розміри і концентрацію структурних дефектів.

Від формування та ущільнення певною мірою залежать не тільки характер структуроутворення зі збереженням однакової компактності укладання частинок, а й текстурні особливості виробу. Наприклад, можлива переорієнтація частинок, у результаті якої широкий розтин частинок і пор нерідко розташовується в площинах, паралельних площині пресування, з появою анізотропії. Можливе також часткове подрібнення зерен довгастої форми або зміна (зменшення) обсягу.

За напівсухого пресування обсяг отриманого виробу може виявитися в 1,5 ... 2 рази меншим обсягу вільно насипаної суміші (маси). Природно, що тоді скорочується і пористість. Так, із формули О. С. Бережного:

$$\Pi = a - v \cdot \lg p,$$

де Π – загальна пористість, %; a , v – сталі коефіцієнти, причому стала a як пористість початкової маси перед пресуванням 50 %, а v відображає здатність до ущільнення; p – тиск пресування, МПа,

впливає, що в разі $p \approx 100$ МПа, в багатьох випадках $v = 15$ і $\Pi \approx 20$ %, тобто пористість скоротилася у 2,5 раза (50 : 20). Розподіл тиску по вертикалі знижується від штамп, що спричинює неоднорідність у пористості відформованого сирого виробу (сирцю).

Неоднорідність залежить не тільки від висоти виробу, а й від гідравлічного радіуса:

$$R = 2F/I,$$

де F – площа; I – периметр виробу.

Нерівномірність пористості фіксується і в горизонтальних перетинах: найбільша щільність утворюється у верхніх горизонтальних перетинах сирцю біля стінок прес-форми, зменшуючись до центра. В нижніх перетинах спостерігається зворотне явище, а в середніх по висоті перетинах – зона рівнопористості. Тип преса теж має значення, але щільність сирцю завжди залежить від величини тиску, технологічних властивостей маси і часу дії тиску преса; іноді важливо обумовити також і швидкість наростання максимального тиску за ущільнення [6].

Крім звичайних пресів (механічних, гідравлічних) у деяких технологіях використовують пресування методом вибуху з утворенням надвисоких тисків миттєвої дії зі зміною кристалохімічної будови речовини. Способом пластичного формування ущільнення здійснюється в стрічкових пресах (найчастіше вакуумних) із подальшим допресуванням.

Найхарактерніше у технологіях із вібраційним формуванням – надання швидкостей і прискорень частинкам маси і, як наслідок, ослаблення сил внутрішнього тертя і молекулярних зв'язків, а також тиксотропне руйнування первинних структур (рис. 2).

Частинки переміщуються відносно одна одної із щільним укладанням. Використовують поверхневі, навісні, глибинні вібратори, вібростоли, вібротрамбівки тощо. Інтенсивність вібрації виражають у вигляді віброприскорення W , см/с²:

$$W = A\omega^2 = A \cdot 4\pi^2 f^2,$$

де A – амплітуда коливань (половина найбільшого розмаху); ω – кутова швидкість, рад/с; f – частота коливань, Гц.

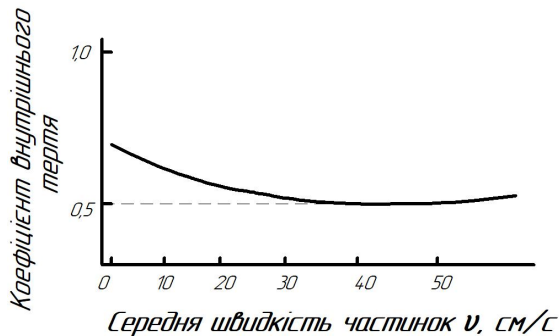


Рис. 2. Залежність коефіцієнта внутрішнього тертя віброваної маси від середньої швидкості переміщення частинок, см/с : $v = A2f$, де A – амплітуда коливань; f – частота коливань, Гц

Добуток величин A та ω дає середню швидкість руху частинок під час вібрації. Є оптимальні значення амплітуди, віброприскорення, які залежать від глибини проробки шару маси. Вібрування з прискоренням, яке перевищує оптимальне, супроводжується розпушуванням і диференціацією частинок за крупністю. Розпушення усувають шляхом привантаження під час вібрації, наприклад, до 8...10 МПа. Оптимальний час вібрування визначають дослідним шляхом.

Під час вібраційного пресування досягається задана пористість виробів зі значно меншими витратами енергії, ніж за статичного пресування. Крім того, зростає якість виробів, немає анізотропії властивостей, формується більш рівномірна структура. Ефективність вібропресування в низці технологій підвищується шляхом поєднання з вакуумуванням.

Ґрунти являють собою трифазну систему з мінеральними частинками, водою та повітрям. Мета пресування полягає в отриманні високоущільнених виробів за рахунок усунення вільного простору між частинками та їх пластичної деформації, а також у наданні їм необхідних розмірів та форми. Режими пресування, залежно від напрямків зусиль, односторонній та двосторонній; за кратністю прикладання зусилля – одно- та багаторазове; за характером зусилля – ударне та статичне

(стискування) [7–10].

Початок пресування сировини супроводжується її ущільненням за рахунок зміщення частинок між собою та їх наближення. При цьому відбувається часткове вилучення повітря з матеріалу.

Наступна стадія ущільнення характеризується пластичною необоротною деформацією частинок. При цьому збільшується контактна поверхня між частинками. Одночасно із цим ущільнення кожної елементарної частинки супроводжується витісненням вологи з її глибинних шарів на контактну поверхню частинки. На завершальній стадії ущільнення настає пружна деформація частинок. Стадія супроводжується їх крихким руйнуванням, за якого пресування отримує найбільше ущільнення і найбільше зчеплення.

Зменшити енергомісткість формування матеріалів дозволяє технологія зонного нагнітання сировини [11], основою якої постає ефект текучого клина. Технологія зонного нагнітання – це одна з базових технологій, застосованих у багатьох галузях промисловості. У першу чергу – у промисловості будівельних матеріалів, а також у дорожньому будівництві, в порошковій металургії, у виробництві вогнетривких матеріалів, у ливарному та низці інших виробництв, де потрібно отримати щільні структури із сипких середовищ.

Ефект текучого клина – це утворення локальної щільної плинної зони корельовано рухомих частинок сипкого середовища. Основна властивість згаданого ефекту полягає в тому, що щільність матеріалу в зоні та її геометричні розміри залишаються незмінними, незважаючи на безперервне вдавлювання в зону нових порцій матеріалу. При цьому знову вдавлювані порції витісняють із зони такий же обсяг матеріалу, який займають самі, що викликає постійне оновлення або, інакше, течії матеріалу в ній.

У технології випалювальних ШБК широко використовують так зване шлікерне лиття для отримання тонкостінних виробів

або виробів великого розміру і складної форми. Шлікер – водна суспензія глин, каолінів, інших тугоплавких речовин із частинками розміром близько 10^{-4} см, які несуть певний іонний потенціал (ІІ)

$$\text{ІІ} = Z/r,$$

де Z – заряд катіона; r – його іонний радіус.

За значень $\text{ІІ} = 65 \dots 100$ (суспензія з кислих матеріалів) отримують підвищені значення щільності відливок, тобто з відносною щільністю, рівною $0,8 \dots 0,9$. Спосіб шлікерного лиття більш залежний від природи сировини, ніж інші способи ущільнення.

Для формування та ущільнення нерідко застосовують торкретування з перенесенням суміші до поверхні за допомогою стиснутого повітря. Такий спосіб дозволяє отримувати досить щільний шар формованої речовини. Однак при цьому відбувається неминуча втрата використовуваної суміші у зв'язку з відскоком частинок.

Висновки.

1. Оптимізація структури з одночасним забезпеченням рівня заданих властивостей відповідає досягненню найвищої якості в матеріалі або виробі. Технологія за цим критерієм стає прогресивною.

2. Для зменшення водопоглинання цементних бетонів необхідно забезпечувати оптимальні умови гідратації цементу та створення щільного конгломерату з мінімальною кількістю пор;

3. У зв'язку з актуальністю створення будівельних матеріалів та виробів із матеріалів навколишнього середовища будівництва (грунтоблоків) та зменшення енергомісткості під час формування та пресування слід продовжити розробки технологій та конструкцій обладнання для отримання оптимальної структури конгломерату з мінімальним водопоглинанням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пашченко Т. М., Світла З. І. Будівельне матеріалознавство : навч. посіб. Київ : Аграрна освіта, 2013. 330 с.
2. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение : учеб. пособ. для бакалавров. 4-е изд. Москва : Издательство Юрайт, 2014. 701 с.
3. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матер. І Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Мелітополь, 01–24 квітня 2020 р.). Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 485 с.
4. Комар А. С., Болтянська Н. І. Огляд способів ущільнення порошкоподібних та дрібних сипких матеріалів. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 238–244.
5. Батяновский Э. И., Бондарович А. И. Вибропрессованный бетон : технология и свойства. Минск : БНТУ, 2018. 263 с. ISBN 978-985-583-088-8.
6. Шлегель И. Ф. Проблемы полусухого прессования кирпича. Москва : Стройматериалы, 2005. С. 18–19.
7. Савицький М. В., Шатов С. В., Новиченко Н. В., Кучук І. П., Довгаленко Д. О. Удосконалення технологічного обладнання для виготовлення ґрунтоблоків. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Вып. 68. 2013. С. 368–375.
8. Савицький М. В., Шатов С. В. Мобільне технологічне обладнання для виготовлення ґрунтоблоків. // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 75. 2014. С. 34–42.
9. Шатов С. В., Савицький М. В., Євсєєв Є. О. Удосконалення технологічного процесу виготовлення ґрунтоблоків. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Вып. 91. 2016. С. 168–172.
10. Шатов С. В., Савицький М. В., Євсєєв Є. О. Організаційно-технологічні рішення виготовлення ґрунтоблоків. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Вып. 81. 2016. С. 261–267.
11. Зубкин В. Е., Коновалов В. М., Королев Н. Е. Зонное нагнетание сыпучих сред. Москва : ООО ИнноЦентр.Ру, 2011. 161 с.

REFERENCES

1. Pashchenko T.M. and Svitla Z.I. *Budivel'ne materialoznavstvo: navchal'nij posibnik* [Building materials science :

Tutorial]. Kyiv : Agrarna osvita Publ., 2013, 330 p. (in Ukrainian).

2. Ryb'yev I.A. *Stroitel'noye materialovedeniye: ucheb, posobiye dlya bakalavrov* [Building materials science: textbook, manual for bachelors]. Moscow : Izdatel'stvo Yurayt, 2014, 701 p. (in Russian).

3. *Tekhnichne zabezpechennya innovatsiynykh tekhnolohiy v ahropromyslovomu kompleksi : materialy I Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konferentsiyi (Melitopol', 01–24 kvitnya 2020 r.)* [Technical support of innovative technologies in the agro-industrial complex : materials I International. scientific-practical Internet conference (Melitopol, April 1–24, 2020)]. Melitopol' : TDATU, 2020, 485 p. (in Ukrainian).

4. Komar A.S. and Boltyans'ka N.I. *Ohlyad sposobiv uschil'nennya poroshkopodibnykh ta dribnykh syppykh materialiv* [Review of methods of compaction of powdered and fine bulk materials]. Melitopol' : TDATU, 2020, pp. 238–244. (in Ukrainian).

5. Batyanovskiy E.I. and Bondarovich A.I. *Vibropressovanny beton : tekhnologiya i svoystva* [Vibropressed concrete : technology and properties]. Minsk : BNTU, 2018, 263 p. ISBN 978-985-583-088-8. (in Russian).

6. Shlehel' I.F. *Problemy polukhohogo pressovannya kirpicha* [Problems of semi-dry pressing of bricks]. Moscow : Stroymaterialy Publ., 2005, pp. 18–19. (in Russian).

7. Savyts'kyi M.V., Shatov S.V., Novychenko N.V., Kuchuk I.P. and Dovhalenko D.O. *Udoskonalennya tekhnolohichnoho obladnannya dlya vyhotovlennya hruntoblokiv* [Improvement of technological equipment for the manufacture of soil blocks]. *Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya : Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh ekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo (ustoychivogo) razvitiya* [Construction. Materials Science. Engineering. Series : Creation of high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development]. Vol. 68, 2013, pp. 368–375. (in Ukrainian).

8. Savyts'kyi M.V. and Shatov S.V. *Mobil'ne tekhnolohichne obladnannya dlya vyhotovlennya gruntoblokiv* [Mobile technological equipment for the manufacture of soil blocks]. *Stroytel'stvo. Materyalovedeniye. Mashynostroeniye* [Construction. Materials Science. Engineering]. Vol. 75, 2014, pp. 34–42. (in Ukrainian).

9. Shatov S.V., Savyts'kyi M.V. and Yevsyeyev Yev.O. *Udoskonalennya tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennya hruntoblokiv* [Improvement of technological process of making soil blocks]. *Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya: Innovatsionnyye tekhnologii zhiznennogo tsikla ob'yektiv zhilishchno-grazhdanskogo, promyshlennogo i transportnogo naznacheniya* [Construction. Materials Science. Engineering. Series : Creation of high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development]. Vol. 91, 2016, pp. 168–172. (in Ukrainian).

10. Savyts'kyi M.V., Shatov S.V. and Yevsyeyev Yev.O. *Orhanizatsiyno-tekhnolohichni rishennya vyhotovlennya hruntoblokiv* [Organizational and technological solutions for the manufacture of soil blocks]. *Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya: Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh ekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo (ustoychivogo) razvitiya* [Construction. Materials Science. Engineering. Series : Creation of high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development]. Vol. 81, 2016, pp. 261–267. (in Ukrainian).

11. Zubkin V.E., Konovalov V.M. and Korol'ov N.E. *Zonnoye nagnetaniye sypuchykh sred* [Zone injection of bulk media]. Moscow : OOO YnnoTsentr.Ru, 2011, 161 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 21.02.2022.