

МОДЕЛЮВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ: ВЧОРА, СЬОГОДНІ, ЗАВТРА

© Верба В.Б., 2007

Наведено загальний огляд методів моделювання зчеплення бетону і арматури на прикладі "технічної теорії зчеплення" та методу скінченних елементів та методи розв'язання контактних задач. Подано перелік факторів, що впливають на якість зчеплення. Вказано напрями розвитку та вдосконалення моделей зчеплення арматури та бетону. Коротко проаналізовано проблеми моделювання зчеплення арматури з пінобетоном.

The general review of bonding modeling methods by the example of “the technical theory of bonding” and finite element modeling is carried out in the article, other methods of solution of contact tasks are mentioned. The list of factors which have effect on quality of bonding is given. Directions of development and perfection of reinforcing bars and concrete bonding models are indicated. The problems of foam concrete and reinforcing bar bonding modeling is briefly analyzed.

Постановка проблеми. Закономірності взаємодії арматури і бетону визначають особливість залізобетону як матеріалу. Вивченню цієї взаємодії присвячена теорія зчеплення.

Доля цієї теорії своєрідна. Експериментальні дослідження зчеплення проводилися десятки років тому, проводяться вони й зараз, але теорія зчеплення лише вийшла зі стадії свого становлення. Кожне покоління вчених працює, використовуючи досвід усіх попередніх поколінь. Велика кількість дослідних даних потребує правильної та універсальної інтерпретації, а це не так просто у випадку контактної взаємодії.

Крім того, існують об'єктивні технічні труднощі, які ускладнюють або й унеможливають розроблення універсальної технічної теорії зчеплення, а саме: різноманітність форм та розмірів з/б елементів, видів армування, умов роботи конструкції та арматури зокрема; випадковий характер формування контакту; розвиток таких процесів, як осадка бетонної суміші та зсідання бетону тощо.

І це лише декілька перешкод, які ставали на шляху радянських (М.М. Холмянський, Ш.А. Алієв, Ф.С. Белавін, Б.С. Гольдфайн, В.В. Зайцев, В.М. Кольнер, Л.П. Серова, Ф.Є. Клименко) та зарубіжних (Abrams D., Goto I., Lutz L., Gergely P., Rehm G., Broms B.) науковців.

Актуальність цієї статті обумовлена ще й тим, що, незважаючи на всю важливість вивчення контакту бетону з арматурою, у науковому світі поширена недовіра до можливостей теорії зчеплення в інженерних розрахунках. Монографії на тему зчеплення відомі лише вузькому колу науковців, які займаються цим питанням, а сучасні навчальні підручники подають лише стислі результати їхньої роботи без теоретичного підґрунтя. Популяризація та відкриття можливостей практичного застосування теорії зчеплення – основна мета цієї роботи.

Основні досягнення досліджень зчеплення. Спочатку в основному досліджували зчеплення гладкої арматури з бетоном і пояснювали його силами тертя та адгезії. Причиною появи перших вважали радіальний тиск від зсідання бетону. Під час досліджень профільованої арматури на перший план вийшло зминання бетону на малих площадках. Згодом Г. Ремом та М.М. Холмянським було встановлено, що в малих об'ємах бетон крихкий, але чинить підвищений опір зсуву та відриву. Дослідження Ю. Гото виявили наявність системи контактних тріщин, що остаточно підтвердило можливість застосування тришарової моделі.

До 50-х років ХХ ст. було з'ясовано вплив на зчеплення таких факторів, як осадка бетонної суміші та зсідання бетону, положення арматури та зразка під час бетонування, товщина захисного шару, поява тріщин розколювання тощо.

У 1957 р. у ВНДІЗалізобетону та НДІЗБ під керівництвом М.М. Холмянського розпочалися повномасштабні дослідження контакту арматури з бетоном, результатом яких стала розроблена та приведена до практичного використання "технічна теорія зчеплення".

Технічна теорія зчеплення: суть, умови та результати використання [1–4]. Технічна теорія зчеплення (ТТС) вивчає закономірності перерозподілу зусиль між бетоном і арматурою. Якщо середні напруження в бетоні і арматурі в процесі цього перерозподілу не наближаються до граничних значень, задача теорії зчеплення виступає, так би мовити, в чистому вигляді. Це "основна задача теорії зчеплення". Інакше ми приходимо до "спеціальних задач теорії зчеплення", які, попри свою важливість, все ж таки не є для неї основними і вже значною мірою належать іншому розділу теорії залізобетону – теорії тріщиноутворення.

При виборі розрахункової моделі для розв'язання основних задач теорії зчеплення можна вважати, що арматура деформується пружно, а бетон в основній своїй частині принаймні не втрачає суцільності. Зате для бетону контактного шару завжди властиві значні локальні деформації, що приводять до розвитку локальних і деструктивних процесів, оскільки під час розв'язування основних задач напруження в бетоні поза контактним шаром (в "бетонній оболонці") обмежені, природно припустити, що опір контактного шару зсуву залежить лише від величини цих місцевих деформацій. Зазначимо, що абсолютно аналогічна ситуація спостерігається при розрахунку широко вживаних "тришарових конструкцій", теорія розрахунку яких значно розвинулася завдяки тому, що в роботі середнього слабкого шару стало достатнім врахувати тільки опір зсуву і поперечному стиску. Використовуючи цю аналогію, вважатимемо основною модель "арматура – контактний шар – бетонна оболонка", в якій властивості контактного шару прогнозуються на основі випробувань на зсув, незалежно від напруженого стану в бетонній оболонці. Така наближена оцінка роботи контактного шару є загальноприйнятною, хоча, яким би не був спосіб з'єднання, опір сполучних елементів або суцільного шару зсуву завжди залежить від того, в якому полі нормальних напружень зсув відбувається. Під час розгляду контакту між бетоном і арматурою такий підхід тим більше доречний, що основною для роботи контактного шару стає задача врахування недосконалості контакту. Її розв'язок, зокрема, пов'язаний з необхідністю розрізняти випадки виходу арматури з бетону і проникання її в бетон. Таке розмежування дає змогу врахувати знак напружень в бетонній оболонці.

Органічний недолік тришарової моделі – неможливість чітко виділити контактний шар. Перебільшувати цю складність не треба, оскільки численні тріщини, що виникають в зоні контакту саме через велику їхню кількість, при обмежених розтягувальних напруженнях в бетонній оболонці залишаються локальними. Разом з тим, використання трикомпонентної моделі дає змогу коректно побудувати теорію зчеплення, близьку до структури класичних розділів науки про опір матеріалів.

Значно складнішим є розв'язання спеціальних задач теорії зчеплення. Тут у кожному окремому випадку доводиться по-своєму вирішувати питання про вибір моделі, а допустимість тих або інших спрощувальних припущень про роботу контактного шару повинна перевірятися досвідом.

Якщо застосовується трикомпонентна модель, виникає питання про те, як описати фізичні властивості контактного шару. У випадку залізобетону контактний шар чітко не окреслений, замість кута зсуву зручно вводити іншу характеристику – "умовні взаємні зсуви", під якими розуміють зсуви арматури щодо достатньо віддалених від неї точок бетонного перетину. В основу цього визначення покладено той факт, що переміщення, обумовлені депланацією бетонної оболонки, малі порівняно з переміщеннями, зумовленими деформаціями контактного шару. Уявлення про умовні взаємні зсуви в розрахунковому і експериментальному відношенні загалом зручне і лише вимагає відмови від зразків з дуже малим перетином бетонної оболонки, адже такі зразки все одно були б неприйнятні з конструктивних міркувань.

Залежність між умовними взаємними зсувами g і умовними дотичними напруженнями τ_{34} , що характеризує поведінку контактного шару, отримала назву "закон зчеплення".

При використанні цього закону виникає запитання: чи можна вважати властивості контактного шару постійними за довжиною, тобто незалежними від відстаней до торця призматичного елемента.

Досвід досліджень показує, що у разі використання бетонів з доброякісною структурою, при обмеженні можливого осідання бетонної суміші і усадки бетону, тобто в тих випадках, коли забезпечена необхідна густина контакту, закон зчеплення можна вважати єдиним за всією довжиною зон перерозподілу. Необхідно лише у разі вільної або розтягнутої поверхні торця призматичного елемента враховувати виколування конусів, вилучивши з глибини закладання ділянку завдовжки до півтора діаметра арматури.

Разом з тим, зустрічаються випадки, коли необхідно враховувати змінність закону зчеплення. Нерівномірність властивостей контакту спостерігається, наприклад, при підвищеній усадці бетону, при різких режимах пропарювання (особливо, якщо арматура розташована в напрямі укладання бетону). У цих випадках від закону зчеплення доводиться переходити до залежності вигляду $\tau = F(g, x)$, тобто вводити в розрахунок абсолютну величину відстані від певної точки до поверхні бетону. Не можна розраховувати, що в явищах зчеплення збережеться геометрична подібність. Вона порушується навіть при однорідному контактному опорі. Це пояснюється тим, що зміна глибини профілізації арматури викликає зміну напрямку внутрішніх тріщин.

За вибором аналітичної форми закону зчеплення робилися різні пропозиції, з яких доцільно виділити як найбільш універсальний так званий "нормальний закон зчеплення":

$$\tau_{зч} = B \frac{\ln(1 + \alpha g)}{1 + \alpha g}, \quad (1)$$

де α і B – параметри зчеплення.

Інколи достатнє наближення дає "пружно-пластичний закон зчеплення":

$$\tau_{зч} = \begin{cases} \tau_0 \frac{g}{g_*} & \text{при } g \leq g_* \\ \tau & \text{при } g \geq g_* \end{cases}, \quad (2)$$

де τ_0 і g_* – параметри зчеплення.

У випадку вдавлювання арматури в бетон або у разі передавання попереднього напруження, разом з процесами руйнування бетону відбувається його ущільнення і введення в роботу все більших об'ємів бетону. Тому напруження зчеплення не зменшуються, і закон зчеплення можна подати степеневою функцією:

$$\tau_{зч} = A \cdot g^{\nu}. \quad (3)$$

Деякі радянські науковці, керуючись бажанням якомога більше спростити та оцінити величину напружень зчеплення на основі даних про міцнісні характеристики бетону, пропонують формули типу:

$$\tau_{зч} = A \cdot R_m \text{ або } \tau_{зч} = A \cdot R_m - B \cdot R_m^2, \quad (4)$$

де R_m – кубикова міцність бетону.

Загалом, при еталонних умовах експерименту параметри зчеплення завжди можна подати через номінальний діаметр арматури та міцнісні характеристики бетону.

Для прикладу можна навести формулу Ю.Л. Ізотова для арматури періодичного профілю:

$$\tau_{зчув} = (0.58 - 0.0053 \frac{l_a}{d}) R. \quad (5)$$

Моделі зчеплення за методом скінченних елементів [5]. Тоді як вітчизняна наука йшла шляхом розвитку аналітичних залежностей в теорії зчеплення, західна наука зосередилася на практичних розрахунках величин зчеплення та взаємних переміщень арматурного стрижня та бетону з використанням комп'ютерних технологій. Подана нижче інформація представляє розроблену на заході модель зчеплення сталі з бетоном для використання в аналізі зчеплення методом скінченних елементів (МСЕ).

Для створення моделі, яка б характеризувала поведінку зчеплення, було використано дані з попередніх досліджень цього явища. Явище зчеплення можна подати як комбінацію декількох спрощених механізмів. Узагальнену дію цих механізмів, визначену на підставі даних з попередніх експериментальних досліджень, було неодноразово використано для перевірки запропонованої моделі.

Для оцінювання зчеплення необхідно спочатку обрати масштаб, в якому воно повинно розглядатися. Реакцію зчеплення можна досліджувати, описувати і аналітично моделювати в трьох різних масштабах. Ці масштаби зазвичай визначаються такими вимірами: структурний елемент, арматурний стрижень і виступи на арматурі (рис. 1, рис. 2, рис. 3 відповідно). Модель, розроблена для зчеплення в специфічному масштабі, вимагає унікального набору даних і відповідає лише ряду визначених матеріальних моделей.

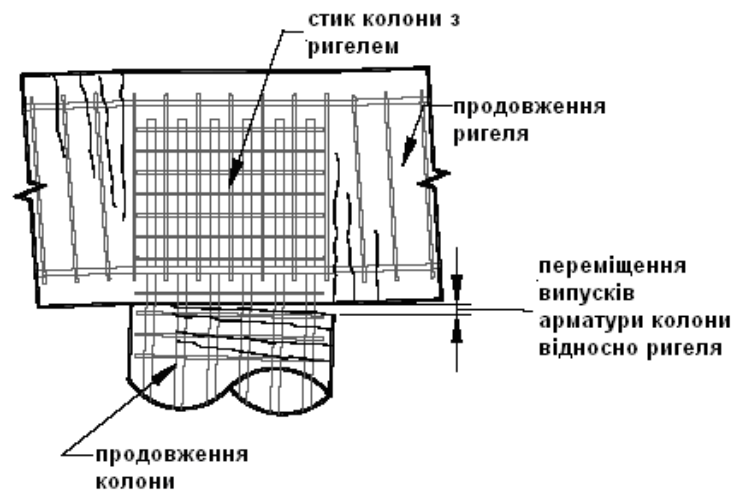


Рис. 1. Зчеплення в масштабі конструктивних елементів

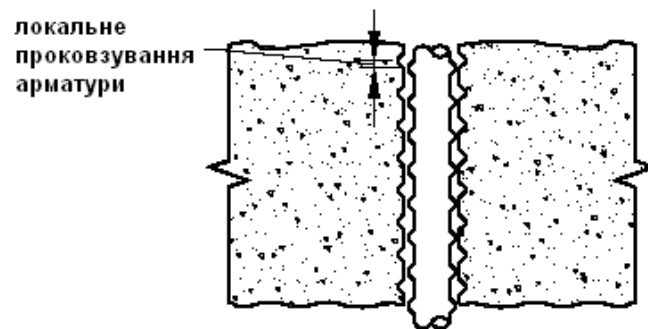


Рис. 2. Зчеплення в масштабі арматурного стрижня

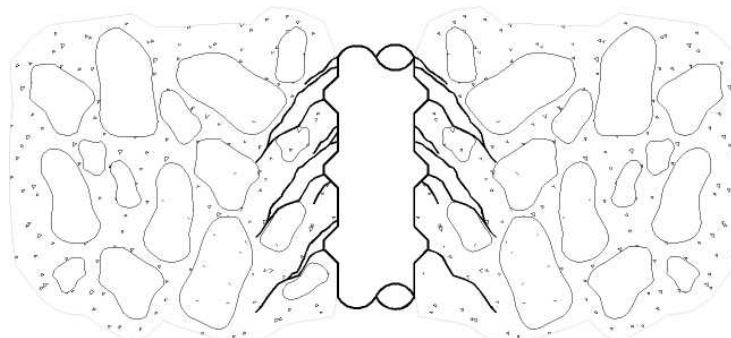


Рис. 3. Зчеплення в масштабі виступів арматурного стрижня

Моделювання зчеплення в масштабі конструктивного елемента потребує розвитку такої моделі, яка б характеризувала дію зчеплення на всю балку, колону або їхній стик. Зазвичай такі моделі відповідають зчепленню тільки для одного специфічного конструктивного елемента (наприклад, арматури мостової колони, посиленої кільцевими хомутами, заанкереної в поширеній вниз подушці фундаменту, арматури мостової колони зі спіральною поперечною арматурою, заанкереної в жорсткому монолітному стику колони з ригелем або поздовжньої арматури ригеля, заанкереної в стику, підсиленому поперечними хомутами). Ця системна залежність обов'язкова, тому що в зборі експериментальних даних в масштабі конструктивного елемента неможливо цілком ізолювати механізми зчеплення від дії згину, зрізу та кручення. Також, неможливо визначити точно стан зони зчеплення під час експерименту. На додаток до створення моделі зчеплення, яка не застосовна у всіх випадках, розвиток моделі в масштабі конструктивного елемента зазвичай не полегшує її використання в межах неперервних скінченних елементів. У цьому масштабі дані про зчеплення часто містять кумулятивну інформацію – як, наприклад, повне проковзування арматури між двома конструктивними елементами або повну передачу зусилля зчеплення на відносно великій зоні заанкерення. Припущення про розподіл напружень і деформацій в зоні зчеплення, можливо, ставлять під загрозу як загальність, так і об'єктивність глобальної моделі.

Зчеплення можна розглядати і в масштабі виступів на арматурних стрижнях. У цьому масштабі зчеплення визначається фізико-механічними властивостями цементного каменю і заповнювача, характеристиками деформативності сталевого арматурного стрижня, передаванням напружень між цементним каменем і заповнювачем і мірою розсіяння енергії внаслідок тріщиноутворення і змінання цементного каменю і заповнювача. Однак дані, що визначають фізико-механічні властивості цементного каменю, заповнювача і матеріалів зони зчеплення лабораторних зразків залізобетону, які використовувалися в різних дослідженнях зчеплення, є обмежені. Розвиток аналітичної моделі системи у цьому масштабі ускладнений необхідністю зважати на неоднорідність бетону, визначати точні деформації арматурної сталі і тріщин в бетоні поблизу стрижня. Використання моделі в масштабі арматурних виступів в глобальній моделі МСЕ вимагає введення складних алгоритмів або дрібної розбивки. Спеціальні алгоритми потрібні, тому що рівень мінімізації скінченних елементів, який потрібний для реального представлення зони зчеплення, не підходить для моделювання повного субелемента, оскільки він робить недійсним припущення про однорідність матеріалу бетону, тобто виникає проблема, надскладна навіть для комп'ютерного розрахунку. Алгоритм для спрощення виконання моделі зони зчеплення в масштабі виступів є загальним методом субелементного поділу. Проте субелементи дуже ускладнюють алгоритм розв'язання для нелінійних задач, не виключається необхідність вводити неоднорідність матеріалу, вимагається введення деяких припущень про поведінку поверхні між зоною зчеплення і рештою системи. Впровадження моделі масштабу виступів значно її ускладнює і ставить серйозні обчислювальні вимоги. Проте не відомо, чи це супроводжується кращою точністю в описі глобальної поведінки зразків. Тому вважаємо, що модель у масштабі виступів не є найкращим масштабом для моделювання зчеплення.

Для дослідження зчеплення найкращим визнається масштаб арматурного стрижня. У цьому масштабі зона зчеплення представлена однорідним тілом. В експериментальних дослідженнях зазвичай використовуються зразки достатнього розміру, щоб вважати систему складеною з однорідного бетону, сталі і зони зчеплення. Експериментальні дані з численних попередніх досліджень цього типу доступні і визначають як саме зчеплення, так і його зміну як функцію специфічних характеристик стану зони зчеплення. У цьому масштабі стан зони зчеплення можна характеризувати фізико-механічними властивостями бетону і сталі (наприклад, міцність бетону на стиск і розтяг, межа тріщиноустійкості бетону або межа текучості арматури), які добре визначаються стандартизованими випробуваннями. Нарешті, представлення зони зчеплення в цьому масштабі уможливорює по суті пряме виконання моделі в глобальній моделі МСЕ помірної складності і помірних обчислювальних можливостей.

Паралельно до зарубіжної практики Н.І. Карпенко, прийнявши метод сіток, розв'язав плоску задачу теорії зчеплення і виявив важливі особливості деформування бетону на поверхнях поблизу контакту з арматурою.

Інші методи розв'язання контактних задач. Практично необмежені можливості врахування деформацій бетону поза зоною контакту дає застосування загального методу розв'язання контактних задач теорії пружності, запропонованого А.Я. Александровим. Цей метод успішно застосований для розв'язання задач зчеплення замоноличених в бетонних масивах різноманітних анкерів з врахуванням взаємних зміщень.

Теорію, що позбавлена недоліків ТТС, спробував створити Н.І. Карпенко, запропонувавши модель, яка дає змогу враховувати наявність контактних тріщин та моделювати повний контакт. Умовні взаємні зміщення в моделі Н.І. Карпенка розглядаються як переміщення кінців консольних елементів, на які розділяють бетон тріщини контактного шару (див. рис. 3, 5).

Застосування нових моделей також необхідне і для опису контакту з бетоном канатної арматури та пучків, які здійснюють в бетоні гвинтові переміщення.

Моделювання зчеплення арматури з пінобетоном. На кафедрі будівельних конструкцій і мостів Національного університету "Львівська політехніка" з 2005 року під керівництвом д-р техн. наук., проф. Б.Г. Демчини здійснено різнопланові експериментальні дослідження пінобетонних армованих конструкцій, більшість з яких проводилася за участю автора статті.

Зокрема, автором статті було проведено випробування зчеплення з пінобетоном трьох серій дослідних зразків. Незважаючи на довжину анкерування та вид застосованої арматури, типовий експериментальний зразок містив єдиний заанкерений стрижень в блоці пінобетону (рис. 4).

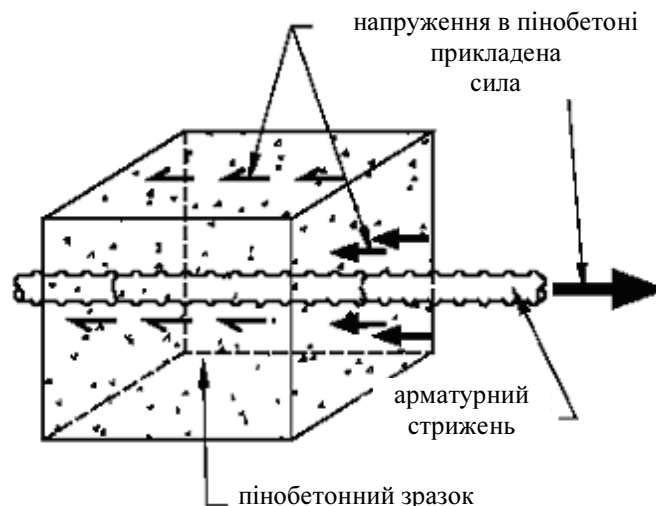


Рис. 4. Типовий експериментальний зразок для дослідження зчеплення

Протягом експерименту вимірювалися відносні переміщення лише незавантаженого кінця стрижня при різних значеннях прикладеної сили. Отримані результати досліджень дають змогу дати емпіричну оцінку міцності зчеплення лише за формулами (4) та (5).

У подальших дослідженнях автор планує вдосконалити експериментальну установку для визначення розподілу напружень за всією довжиною контакту, що дасть змогу визначити необхідні параметри законів зчеплення (1) – (3). Для моделювання явища зчеплення методом скінченних елементів автором планується використовувати масштаб арматурного стрижня, а також перевірити можливість вилучення з загальноприйнятої трикомпонентної моделі зчеплення такого елемента, як "арматура" внаслідок того, що його міцність та мала деформативність значно переважають аналогічні показники пінобетону. Автором висловлюється припущення, що механізм зчеплення арматури періодичного профілю з неавтоклавним пінобетоном забезпечується взаємодією з пінобетоном непорушеної структури пінобетону, деструктованого внаслідок зминання перед виступами на арматурі, тобто пропонується двокомпонентна модель "контактний шар – пінобетонна

оболонка". Зчепленням пінобетону непорушеної структури з арматурою внаслідок адгезії нехтують, оскільки у разі наближення конструкції до граничного стану адгезійні зв'язки руйнуються (рис. 5). Не відкидається також модель, розроблена Н.І. Карпенком; у майбутньому планується також перевірити її застосовність у випадку армованого пінобетону.

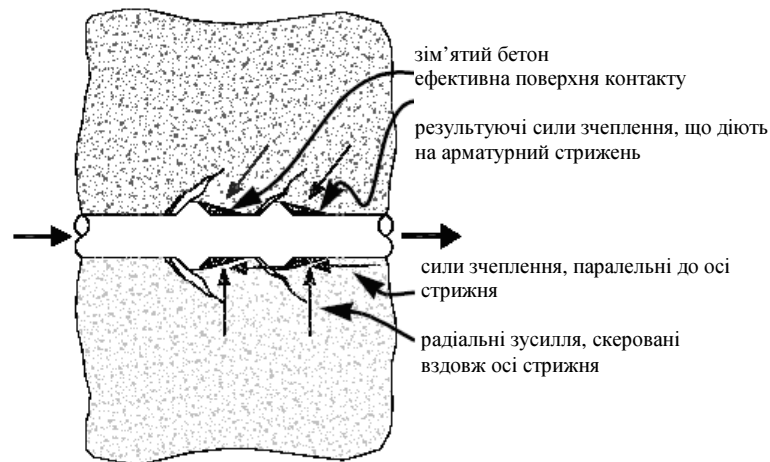


Рис. 5. Ідеалізація зони зчеплення

Висновки. Існує дуже багато ще не вивчених факторів, які можуть вплинути на якість зчеплення. Їхнє вивчення вимагає дорогих, трудомістких та різноманітних експериментальних досліджень, результати яких оброблялися б за однаковою методикою. Лише такий підхід може істотно покращити існуючі моделі та теорію зчеплення загалом.

У роботі показано, що для задач теорії зчеплення основною, але не єдиною розрахунковою схемою є трикомпонентна модель. У майбутньому в цій моделі треба чітко відмежувати деформації від переміщення та деформації від депланації перерізів. Прогнозування поведінки бетону в контактному шарі повинно будуватися на основі його властивостей в об'ємах з характеристичними розмірами порядку міліметрів. Це, своєю чергою, викликає певні труднощі у випадку дослідження пінобетонних армованих конструкцій, оскільки діаметр макропор пінобетону співрозмірний з розмірами, які необхідно досліджувати. Очевидно, що вдасться встановити міцні кореляційні зв'язки між характеристиками зчеплення і поверхневою твердістю. Перші кроки в цьому напрямі у випадку звичайного бетону вже зроблено.

Закон зчеплення – функція багатьох змінних параметрів. Щоб говорити про його універсальність, він повинен враховувати наступні фактори: вид арматури і бетону, його склад та вид заповнювачів, вплив сусідніх арматурних елементів та їх розташування, положення арматурних елементів при бетонуванні та спосіб ущільнення бетонної суміші, вид теплової обробки, температуру і вологість, циклічність заморожувань, зовнішні силові дії, швидкість та тривалість, циклічність навантаження. І це лише не повний перелік факторів, які можуть підштовхнути науковця до досліджень, які би проводилися для поповнення наших знань.

1. Сцепление арматуры с бетоном. Краткое изложение сообщений на конференции по проблеме сцепления арматуры с бетоном (25-27 июня 1968 г.). / Под ред. А.А. Оатула. – Челябинск, 1968. – 115 с. 2. Анкеровка арматуры в бетоне (Исследование прочности и податливости): Сборник трудов / Под ред. П.К. Балатьева. – М.: Стройиздат, 1969. – 135 с. 3. Сцепление арматуры с бетоном (по материалам Всесоюзного научно-технического совещания в Челябинске). – М., 1971. – 202 с. 4. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с., ил. 5. Lowes L.N. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beam-Column Bridge Connections. – University of California, Berkeley. – Интернет-ресурс.