

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕДУМОВИ ПРО ІДЕАЛЬНУ ПЛАСТИЧНІСТЬ ДО БЕТОНУ

Митрофанов В. П., Довженко О. О., Погрібний В. В. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Обґрунтовано якісний критерій можливості застосування до бетону передумови про ідеальну пластичність, який полягає в можливості існування (протягом хоч би миті) умови пластичності (міцності) по всій області граничного стану бетону, що повністю перетинає тіло, і розвиток котрої необхідний для перетворення його в пластичний кінематичний механізм.

Вирішення практичних задач міцності бетонних та залізобетонних елементів здійснюється головним чином на основі емпіричного підходу. Але розрахункові залежності, одержані таким шляхом, обмежені в застосуванні, пов'язані з великими витратами матеріалів, праці й енергії, не завжди виявляють усі визначальні фактори міцності і тому не приводять до оптимальних конструктивних рішень.

Головним питанням при створенні теоретичного розрахункового апарату, що позбавлений перерахованих вище суттєвих недоліків, є моделювання фізичних процесів деформування та руйнування бетону.

Існують дві протилежні ідеалізовані моделі граничної поведінки суцільного середовища – пластична і крихка, які є фундаментом сучасної науки про руйнування й міцність [1, 2]. Для визначення граничного навантаження в одних випадках використовується теорія пластичності та її варіант – теорія граничної рівноваги, що базуються на моделях пластичних тіл та умовах пластичності (міцності) [3], а в інших – механіка крихкого руйнування, в основі якої лежить модель крихкого тіла і критерії локального руйнування [4].

Вибір розрахункового апарату з наведених двох моделей визначається збіжністю теоретичної міцності з експериментальною.

Модель ідеально пластичного тіла приводить до дійсно простих ме-

тодів розрахунку міцності при складних неоднорідних напружено-деформованих станах (НДС) і тому є привабливою для використання в практиці. Як відомо, теорія пластичності успішно застосовується у вигляді методу граничної рівноваги для розрахунків міцності статично невизначених залізобетонних конструкцій – балок, плит, оболонок. З огляду на це велике значення мають роботи [5, 6]. Пізніше теорія пластичності бетону почала застосовуватися для визначення граничного навантаження масивних елементів при різних НДС. У цьому аспекті відомі роботи [7-9], в яких досягнута близькість теоретичної міцності з дослідною.

Але, незважаючи на певні успіхи, використання передумови про ідеальну пластичність до бетону викликає природні сумніви, пов'язані з відомим фактом обмеження пластичних властивостей бетону. Крім того, існують випадки, які пов'язані зі справді крихким руйнуванням за відривними макротріщинами, і теорія пластичності безумовно не може бути застосована.

Автори статті роблять спробу обґрунтувати деякі *якісні умови* можливості застосування теорії пластичності до бетону, які дотепер чітко не сформульовані у зв'язку із складністю порушеного питання. Встановлення межі можливого використання теорії пластичності до бетону потребує розгляду особливостей процесу розвитку граничного стану деформованого твердого тіла (ДТТ) із структурно неоднорідних матеріалів, до яких належить і бетон.

Процес розвитку граничного стану ДТТ при складних неоднорідних НДС приводить до формування граничної макроскопічної структури, так званого кінематичного механізму (КМ) [3,5]. Розвиток КМ зумовлений досягненням граничного стану матеріалу тіла в найбільш напруженій і деформованій області його (області руйнування), де локалізуються великі необоротні деформації, за рахунок яких частини тіла, що розділені областю руйнування, набувають можливості взаємного руху. За характером можна виділити два якісно різних типи КМ – крихкий та пластичний [10]. При крихкому КМ рівень напружень і деформацій домінує в зоні розтягу, в якій формується макротріщина відриву, раптове розповсюдження якої і призводить до крихкого руйнування. При цьому в стиснутій зоні граничний стан не досягається. Прикладом крихкого КМ є структура бетонної балки в стадії руйнування, де, як відомо із дослідів, перед руйнуванням відбувається “підростання” початкової тріщини і перетворення її в макротріщину відриву (рис. 1, а). Для визначення міцності елементів із крихким КМ найбільш придат-

ною є механіка крихкого руйнування. При пластичному КМ в області руйнування не порушується *макроскопічна суцільність* ДТТ, і процес деформування в граничному стані відбувається більш поступово (безперервно). Характерною рисою пластичного КМ тіл із неоднорідним НДС є *одночасність існування граничного стану по всій області руйнування*. Вказана поведінка пластичного КМ спричинена достатнім ресурсом пластичних деформацій матеріалів ДТТ, для яких може бути використана діаграма пружно-пластичного або жорстко-пластичного тіла. При крихкому КМ, на відміну від пластичного, неможлива *одночасність* граничних напружень по всій поверхні кінематичного перерізу елемента (рис. 1, а).

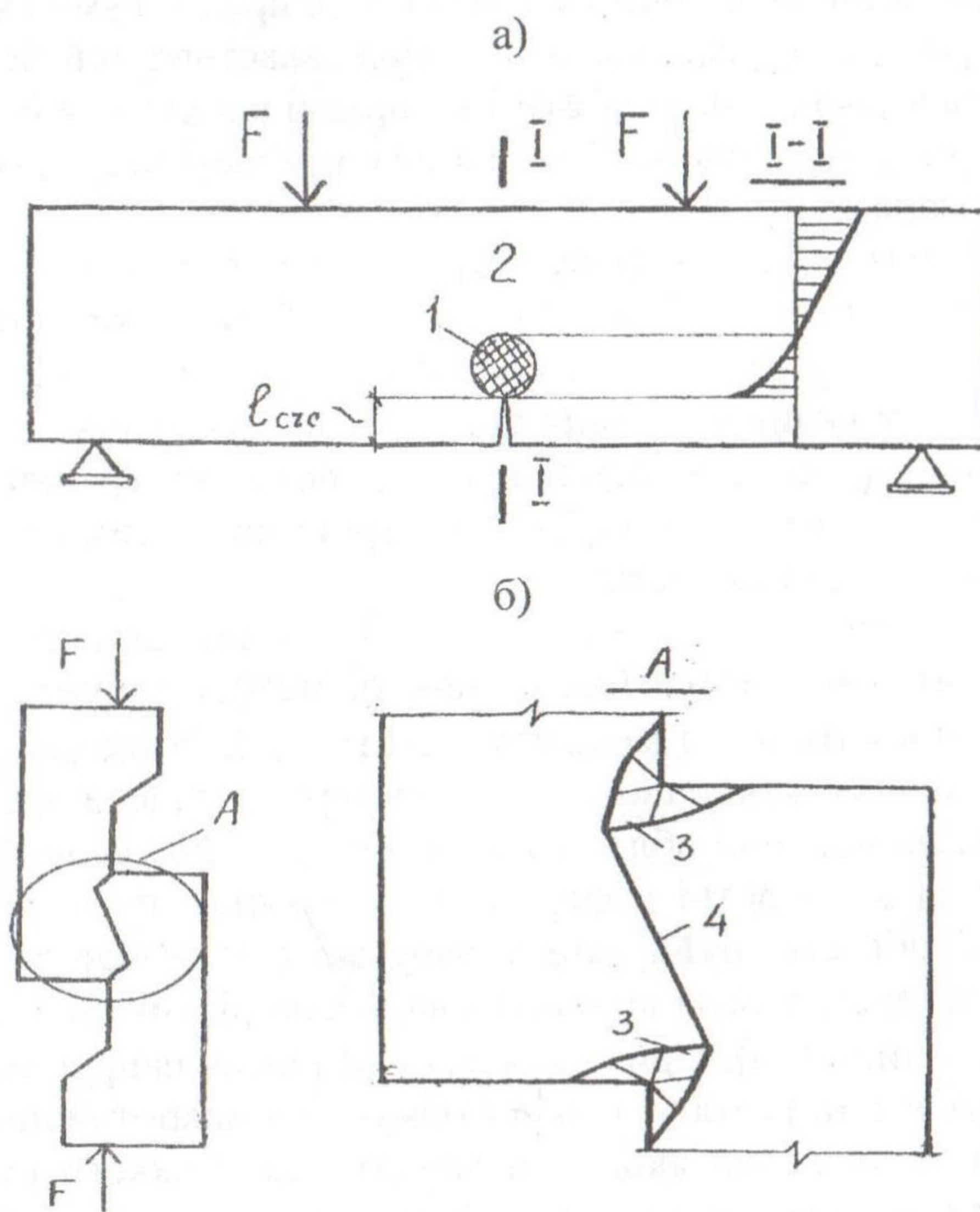


Рис. 1. Приклади реалізації крихкого (а) та пластичного (б) кінематичного механізмів: 1 – зона локального руйнування, 2 – зона пружної поведінки, l_{crc} – довжина макротріщини, 3 – область стиску з випере-

джаючим розвитком граничного стану, 4 – область розтягу з подальшим розвитком граничного стану

Пластичні властивості бетону обмежені і залежать від багатьох факторів, із яких найбільше значення мають вид та клас за міцністю бетону, а також характер НДС. При стискуючих середніх напруженнях пластичні властивості бетону значно зростають. При дуже великих стискуючих напруженнях гірські породи, близькі за властивостями до бетону, деформуються без виникнення мікротріщин і стають практично ідеально пластичними [11]. При середніх стискуючих напруженнях у бетоні відбувається мікротріщиноутворення, і тому необоротні деформації тут прийнято називати “псевдопластичними”. Цей діапазон стискуючих напружень має основне практичне значення для бетонних та залізобетонних конструкцій.

Відомі діаграми “ $\sigma - \epsilon$ ” бетону з достатньою точністю можуть бути апроксимовані трьохланковою кусково-лінійною функцією, яка складається з початкової висхідної ділянки пружної роботи, горизонтальної ділянки умовно ідеальної пластичності обмеженої довжини при граничних напруженнях та низхідної ланки позаграничних станів. Звичайно перешкодою для застосування умови про ідеальну пластичність до бетону вважається обмеженість довжини ділянки умовної пластичності на апроксимованій діаграмі “ $\sigma - \epsilon$ ” бетону. Але навіть для матеріалів із великими пластичними властивостями реально використовується також обмежена ділянка інтервалу ідеальної пластичності. Тому при визначенні можливості застосування теорії ідеальної пластичності до бетону постає питання про ресурс пластичних деформацій, необхідний у конкретних задачах міцності для забезпечення *одночасності* існування граничного стану по всій області руйнування. Кількісно цей ресурс визначити дуже важко, але можливо обґрунтувати деякі якісні умови його достатності.

Таким чином, *якісний критерій застосування теорії пластичності можна сформулювати як можливість існування (протягом хоч б миті) умови пластичності (міцності) по всій області граничного стану бетону, що повністю перетинає тіло, і розвиток котрої необхідний для перетворення його в пластичний КМ.* Наведене формулювання збігається з думкою Ю. М. Работнова, який вважає, що важливим є саме миттєвий розподіл деформацій у граничному стані і несуттєвим виступає те, чи відбудеться в подальшому розділення тіла на частини (крихке руйнування), чи матеріал буде текти [6].

Справедливість сформульованого критерію можна проілюструвати на прикладах елементів, що мають зовні крихкий характер руйнування,

а міцність їх із достатньою точністю визначається за допомогою теорії пластичності. Такими є зразки О. О. Гвоздева, які мають область руйнування, що складається із стиснутих зон 3 біля вхідних кутів елемента, котрі з'єднані між собою розтягнутою зоною 4 (рис. 1, б). Концентрація напружень біля вхідних кутів призводить до прискореного зростання напружень стиску у локальних зонах, у межах яких бетон необоротно деформується, і тільки після цього настає граничний стан у зоні розтягу. Таким чином забезпечується на мить одночасність існування граничного стану по всьому небезпечному (кінематичному) перерізу.

Отже, для з'ясування можливості застосування передумови про ідеальну пластичність необхідно проаналізувати характер напруженого стану найбільш напружених зон елемента. При цьому зустрічаються такі випадки:

1) найбільш напружені зони зазнають розтягу і повністю перетинають елемент – руйнування крихке, передумова про ідеальну пластичність не може бути застосована для структурно неоднорідних матеріалів;

2) найбільш напружені зони включають області розтягу і стискання, тут можливі два варіанти:

а) рівень напружень у розтягнутій області випереджає рівень напружень у стиснутій, одночасність граничного стану розтягнутої і стиснутої зон неможлива – руйнування крихке по розтягнутій зоні, передумова про ідеальну пластичність не може бути застосована (рис. 1, а);

б) рівень напружень у розтягнутій зоні відстає від рівня напружень у стиснутій, граничний стан розтягнутої зони настає після граничного стану стиснутої, тобто має місце одночасність граничного стану по всьому небезпечному перерізові елемента, можливий пластичний механізм, існуючий хоча би нетривалий час, указана передумова може бути застосована (рис. 1, б).

Ураховуючи обґрунтування наведеного вище якісного критерію можливості застосування до бетону передумови про ідеальну пластичність, було розв'язано широке коло практично важливих задач міцності бетонних та залізобетонних елементів, у яких отримана близькість теоретичної міцності з дослідною [12-14].

Розрахунковий апарат теорії пластичності [9, 12-14] можна віднести до інженерних методів розрахунку, що приводять до дійсно простих залежностей, не потребують залучення складних комп'ютерних програм і можуть зайти широке використання в практиці проектування. Вказані якості вигідно відрізняють запропонований метод від відомого методу кінцевих елементів, що пов'язаний із використанням ортотроп-

ної моделі бетону [15, 16] і знайшов застосування для розрахунків складних бетонних та залізобетонних конструкцій із визначенням як граничного навантаження, так і деформацій. Навпаки, в запропонованій методиці метою є визначення тільки граничного навантаження, а деформації мають не визначальне значення. У таких випадках згідно із системним аналізом [17] є доцільним використання більш простих моделей, які дозволяють успішно досягти поставленої мети. Таким чином, сукупність розглянутих задач міцності бетонних і залізобетонних елементів [5, 8, 9, 12-14] та задач подібного їм класу складності найбільш ефективною вирішується на основі моделі ідеально пластичного тіла.

Литература

1. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. Разрушение, том 2: Математические основы теории разрушения. Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – С. 336 – 520.
2. Работнов Ю. Н. Механика деформированного твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
3. Качанов А. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
4. Черепанов Г. А. Механика хрупкого разрушения. – М., 1974. – 640 с.
5. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия: Сущность метода и его обоснование. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.
6. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
7. Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
8. Nielsen M. P., Braestrup M. W., Jensen B. C., Bach F. Concrete Plasticity: Beam Shear, Shear in Joints, Punching Shear. – Copenhagen: Danish Society for Structural Science and Engineering, Technical University of Denmark, 1978. – 130 p.
9. Митрофанов В. П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 6. – С. 23 – 28.
10. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1977. – 278 с.
11. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
12. Митрофанов В. П. Напряженно – деформированное состояние, прочность и трещинообразование железобетонных элементов при поперечном изгибе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 // ВЗИСИ. – М., 1982. – 41 с.
13. Довженко О. О. Міцність бетонних та залізобетонних елементів при мі-

сцевому прикладанні стискуючого навантаження: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Полт. ИСИ. – Полтава, 1993. – 20 с.

14. Погрібний В. В. Міцність бетонних та залізобетонних елементів при зрізі. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ПДТУ ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2001. – 19 с.

15. Карпенко Н. И. К построению общей ортотропной модели деформирования бетона // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – № 2. – С. 31 – 36.

16. Балан Т. А., Клованич С. Ф. Определяющие соотношения для бетона при сложном непропорциональном нагружении и нагреве // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – № 2. – С. 39 – 44.