

БАГРІЙ ОЛЕНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2267-7162>e-mail: bahrio@khmnu.edu.ua

ДОРОФЄЄВ ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3550-3487>e-mail: sa_dor@ukr.net

ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ З СУТТЄВИМ ПРОЯВОМ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

Розглядається важлива для великого класу машин та конструкцій, що взаємодіють з різними "некласичними" матеріалами, проблема впливу на закономірності деформування та руйнування цих матеріалів величин стискуючих напружень.

На основі аналізу результатів численних експериментальних досліджень багатьох науковців зроблено висновок, що міцність більшості матеріалів зростає зі збільшенням величини всебічних стискуючих напружень. Це однозначно свідчить про прояв внутрішнього сухого тертя в граничній стадії деформування таких матеріалів. Тому критерії міцності, або критерії переходу до граничного стану цих матеріалів обов'язково повинні враховувати вплив не тільки девіаторів тензора напружень, але й відношення напружень.

Вплив внутрішнього тертя на закономірності деформування в інтервалі "робочих" напружень суттєво проявляється для дискретних, зернистих та сипких матеріалів: бетонів, ґрунтів, гірських порід, вугілля, зерна та ін. На міцність і деформації зсуву цих матеріалів суттєво впливає величина стискуючих напружень. Тому їх можна віднести до класу матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя. Аналіз дослідних даних, проведених переважно з ґрунтами та сипкими матеріалами, дозволяє зробити висновок, що визначальні фізичні залежності між напруженнями та деформаціями цих матеріалів повинні відображати не тільки зв'язок між девіаторами напружень і деформацій, але й між шаровими тензорами. Залежності такого типу використовуються в нелінійній механіці ґрунтів, але потребують уточнення, теоретичного та експериментального обґрунтування. Робиться висновок про необхідність подальших теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей деформування матеріалів з суттєвим проявом тертя в дограничній стадії. Це дозволить розробити розрахункові моделі для рішення задач взаємодії машин з такими матеріалами.

Ключові слова: стискуюче напруження, закономірності деформування, внутрішнє тертя, дискретний матеріал.

BAHRII OLENA, DOROFIEIEV OLEKSANDR
Khmelnitskyi National University

DEFORMATION AND DESTRUCTION OF MATERIALS WITH SIGNIFICANT INTERNAL FRICTION

The problem of influence of compressive stresses on the patterns of deformation and destruction of these materials, which is important for a large class of machines and structures interacting with various "non-classical" materials, is considered.

Based on the analysis of the results of numerous experimental studies by many scientists, it was concluded that the strength of most materials increases with an increase in the magnitude of all-round compressive stresses. This clearly indicates the manifestation of internal dry friction in the limit stage of deformation of such materials. Therefore, the strength criteria, or the criteria for the transition to the limit state of these materials, must consider the influence of not only the deviators of the stress tensor, but also the stress ratio.

The influence of internal friction on the patterns of deformation in the range of "working" stresses is significantly manifested for discrete, granular and loose materials: concrete, soils, rocks, coal, grain, etc. The strength and shear deformations of these materials are significantly affected by the amount of compressive stresses. Therefore, they can be attributed to the class of materials with a significant manifestation of internal friction. The analysis of experimental data, conducted mainly with soils and loose materials, allows us to conclude that the determining physical dependences between stresses and strains of these materials should reflect not only the relationship between deviators of stresses and strains, but also between layer tensors. Dependencies of this type are used in nonlinear soil mechanics, but require clarification, theoretical and experimental justification.

It is concluded that further theoretical and experimental studies of the patterns of deformation of materials with a significant manifestation of friction in the near-limit stage are necessary. This will make it possible to develop calculation models for solving the problems of interaction of machines with such materials.

Key words: compressive stress, patterns of deformation, internal friction, discrete material.

Постановка проблеми

Проводиться аналіз результатів експериментальних досліджень процесів деформування та руйнування матеріалів, що відносяться до класу матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього сухого кулонового тертя. Проведення таких досліджень в першу чергу викликано необхідністю наукового обґрунтування моделі взаємодії великого класу машин з різними технологічними середовищами, поведінка яких суттєво відрізняється від поведінки "класичних" матеріалів.

Метою роботи є: аналіз експериментальних даних по вивченню впливу внутрішнього тертя на процес деформування та руйнування матеріалів різних класів.

Виклад основного матеріалу

Контактна модель взаємодії об'єднує в собі реологічні моделі елементів машин і технологічного

середовища.

Поведінку деталей та вузлів машин, що виготовлені з найбільш вивченого конструкційного матеріалу – пластичних сталей, задовільно описує розрахункова модель ідеального пружно-пластичного тіла (модель Прандтля). Узагальнена залежність “напруження – деформації”, що відповідає ідеальному пружно-пластичному тілу, показана на рис. 1, реологічна модель – на рис. 2.

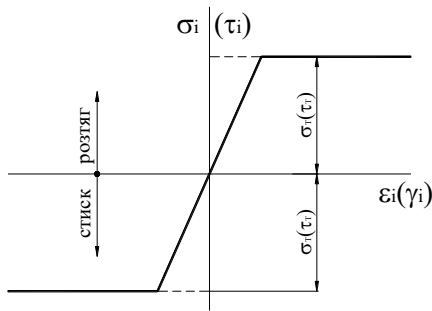


Рис. 1. Діаграма Прандтля

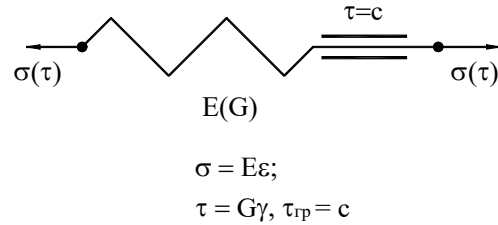


Рис. 2. Реологічна модель ідеального пружно-пластичного тіла

За цією моделлю при інтенсивностях напружень σ_i , менших границі текучості σ_T , тіло деформується пружно за законом Гука, далі – пластично при постійному напруженні $\sigma_i = \sigma_T = \text{const}$. Оскільки інтенсивність напружень σ_i за своєю фізичною суттю є дотичне напруження, це означає, що опір деформації зсуву таких матеріалів не залежать від величини середніх нормальних напружень σ_0 .

Більш складні моделі нелінійної теорії пружності та деформаційної теорії пластичності оперують нелінійними залежностями “напруження – деформація” $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ (рис. 3), але при цьому зберігається умова незалежності опору та деформацій зсуву від величини нормального напруження σ_0 (гіпотеза Людвіга про єдину криву деформування).

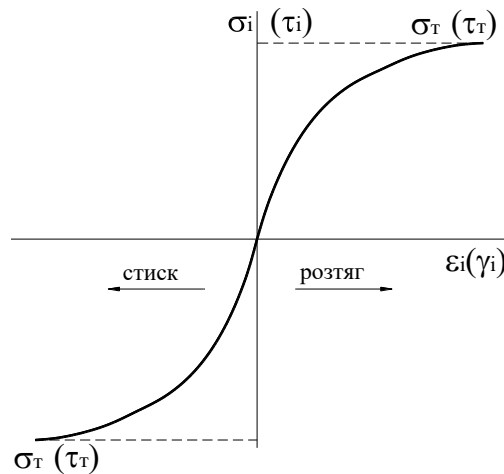


Рис. 3. Крива формозміни деформаційної теорії пластичності

Дослідні перевірки описаних моделей, які проводились на зразках сталей та інших пластичних матеріалів, показали, що в робочому діапазоні напружень впливом тисків на деформації формозміни цих матеріалів можна нехтувати. Це означає, що процес їх деформування можна описати однією кривою, а критерії переходу до граничного стану повинні включати тільки дотичні напруження або різницю напружень.

Технологічні середовища часто являють собою матеріали, закономірності деформування та руйнування яких більш складні.

Аналіз численних дослідів, проведених науковцями з багатьма матеріалами, показує, що їх міцність та деформації зсуву можуть суттєво залежати від величини стискуючих нормальних напружень. До таких матеріалів в першу чергу слід віднести бетони, гірські породи, ґрунти, зерністі та сипкі матеріали. Залежності їх опору зсуву від стискуючого напруження нагадують закон сухого тертя Амонтона – Кулона, тому ці матеріали утворюють особливий клас матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя. Реологічні моделі таких матеріалів крім елементів Гука і Прандтля повинні включати і елемент сухого тертя Кулона. Одна з таких моделей показана на рис. 4.

Наведемо результати аналізу експериментальних даних, що підтверджують вплив сухого внутрішнього тертя на міцність та деформації різних конструкційних матеріалів.

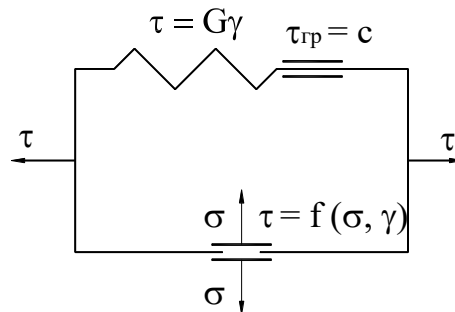


Рис. 4. Реологічна модель матеріалів з суттєвим внутрішнім тертям

Елементи машин в технологічних процесах можуть взаємодіяти з матеріалами різних класів:

- пластичними, міцність яких на розтяг і стиск практично однакова;
- крихкими, міцність яких на стиск більша міцності на розтяг;
- дискретними, міцність яких на розтяг зневажливо мала.

Збільшення міцності при стиску крихких та дискретних матеріалів можна пояснити проявом внутрішнього тертя в діапазоні напружень $\sigma_{\text{мц}}^{\text{р}} - \sigma_{\text{мц}}^{\text{ст}}$. Тому ця особливість може бути ознакою ступеню впливу внутрішнього тертя на міцність матеріалу.

Уявимо, що проведено випробування зразків матеріалу на розтяг і стиск. Результати оформлено графічно за допомогою кругів Мора (рис. 5). Огинаюча АВ граничних кругів для ідеально пластичних матеріалів є горизонтальною, що означає рівність границь міцності на розтяг $\sigma_{\text{мц}}^{\text{р}}$ і стиск $\sigma_{\text{мц}}^{\text{ст}}$. Для крихких та дисперсних матеріалів $\sigma_{\text{мц}}^{\text{ст}} > \sigma_{\text{мц}}^{\text{р}}$, а огинаюча АВ нахилена під деяким кутом φ до осі σ .

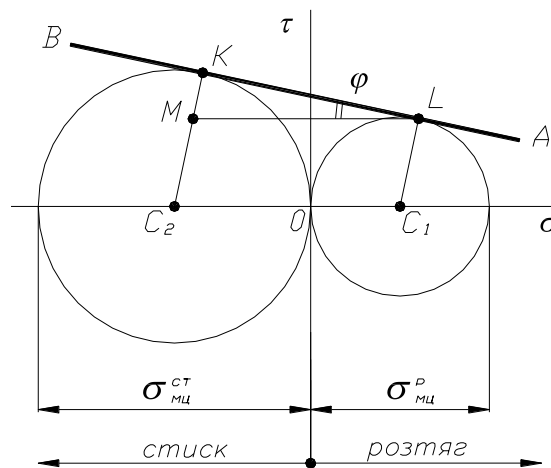


Рис. 5. Граничні круги Мора для крихких матеріалів

Ріст міцності таких матеріалів при збільшенні величини стискуючих напружень є проявом внутрішнього тертя в граничній стадії їх деформування, а кут φ , який іноді називають кутом внутрішнього тертя, можна використовувати для оцінки ступеня впливу внутрішнього тертя на міцність матеріалу.

Критерій цього впливу легко одержати з рис. 5.

$$\sin \varphi = \frac{KM}{LM} = \frac{\sigma_{\text{мц}}^{\text{ст}} - \sigma_{\text{мц}}^{\text{р}}}{\sigma_{\text{мц}}^{\text{ст}} + \sigma_{\text{мц}}^{\text{р}}}. \quad (1)$$

З ростом середнього стискуючого напруження огинаюча граничних кругів викривляється. Тому кут внутрішнього тертя в широкому діапазоні тисків не можна вважати сталою величиною.

Вплив внутрішнього тертя на міцність матеріалів різних класів вивчався багатьма дослідниками. Найчастіше порівнювались граничний опір зсуву матеріалів при звичайних умовах (атмосферному тиску) з величиною опору зсуву при значних всебічних стискуючих напруженнях порядку 2500 – 5000 МПа.

Наприклад, в книзі Bridgman P.W. [1] наведено значення опору зсуву п'ятнадцяти чистих металів при тисках 2500 МПа, 5000 МПа, а також при атмосферному тиску. Ці дані наведено в таблиці 1. Легко побачити, що граничний опір зсуву усіх матеріалів суттєво збільшується з ростом стискуючих напружень. При цьому для значних тисків кут внутрішнього тертя є меншим за величиною, ніж для робочих тисків, що звичайно виникають в деталях машин.

Вплив надвисоких тисків (до 5000 МПа) на міцність різних матеріалів описаний у [2, 3, 4]. Досліди підтвердили майже пропорційне збільшення міцності сталі від величини обжимаючих стискуючих напружень. Кут внутрішнього тертя складає декілька градусів. За результатами випробувань хімічних

елементів, різних марок сталі та деяких сплавів при тисках 10000 – 50000 МПа визначено, що із збільшенням тиску граничний опір зсуву зростає з ростом величини стискуючих напружень, але інтенсивність цього росту зменшувалась із зростанням величини обжимаючого тиску.

Таблиця 1

Метал	Опір зсуву (в МПа) під тиском		Опір зсуву при атмосферному тиску, МПа
	5000	2500	
Al	310	180	30
Pb	68	37	9
Cd	190	110	32
Ca	177	115	25
Co	630	320	123
Fe	1200	660	123
Au	450	240	70
Cu	490	300	105
Ni	870	400	250
Pd	570	400	105
Pt	580	400	95
Ag	470	260	65
Tl	110	44	4.6
Zn	180	105	88
Sn	77	51	13

Crossland В. та Dearden W.H. [5] зразки чавунів з гумовою оболонкою було випробувано при тисках до 530 МПа. Результати випробувань на розтяг і стиск при атмосферному тиску, а також результати випробувань чавуну на кручення під тиском дозволяють зробити висновок, що критичне значення напруження зсуву чавуна суттєво залежить від величини середнього напруження. Аналогічні висновки зроблено за результатами численних дослідів з бетонами, ґрунтами, гірськими породами, сипкими матеріалами.

Експериментально підтверджено, що граничний опір зсуву зернистих та сипких матеріалів повністю визначається внутрішнім тертям. За характеристику міцності цих матеріалів в усіх розрахунках приймається кут внутрішнього тертя φ . Його значення в кожному конкретному випадку визначається спеціальними лабораторними дослідями, частина яких регламентується відповідними нормативними документами.

Таким чином, порівнюючи результати експериментів, проведених на матеріалах різних класів при різних навантаженнях, можна зробити висновок, що внутрішнє тертя не однаково впливає на міцність пластичних, крихких та дискретних матеріалів. В пластичних матеріалах відчувається вплив сухого, кулонового тертя тільки при високих тисках, в крихких – вже при нормальних умовах роботи, а опір руйнуванню дискретних, зернистих та сипких матеріалів повністю визначається внутрішнім тертям. Наведені результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні висновки про те, що в критерії міцності пластичних матеріалів повинні входити тільки дотичні напруження або різниці нормальних напружень, а дискретних матеріалів – відношення дотичних напружень до нормальних.

Викладене вище має відношення до впливу стискуючих напружень на міцність матеріалів або на їх поведінку в граничному стані.

Логічно припустити, що внутрішнє тертя проявляється і в дограничному стані і може впливати на закономірності деформування деяких матеріалів. Виявлення цього впливу є більш складним завданням ніж попереднє.

Прояв впливу внутрішнього тертя треба шукати в тому, що замість прийнятої в нелінійній теорії пружності та деформаційній теорії пластичності “єдиної” кривої деформування $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, яка б залишалась незмінною при збільшенні всебічного тиску $\sigma_0 = P$, процес деформування матеріалу описується поверхнею $\sigma_i = F(\varepsilon_i, \sigma_0)$, або сімейством кривих $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, кожна з яких відповідає якомусь постійному значенню тиску $\sigma_0 = P = \text{const}$.

Вплив внутрішнього тертя на закономірності деформування сталей та чавунів вивчено недостатньо. В роботах [6, 7] наведено результати випробувань зразків різних сталей, чавунів та ін. матеріалів в тому числі в умовах плоскої задачі при різних співвідношеннях головних напружень. Результати досліджень представлено графічно у вигляді областей розсіювання узагальнених кривих $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$. Области розсіювання мають більшу ширину для чавунів ніж для сталей. Це свідчить про те, що вплив внутрішнього тертя є більш суттєвим для крихких матеріалів, ніж для пластичних.

В роботі [8] наведено результати випробувань зразків полімерів при різних тисках. Показані на рис. 6 криві підтверджують висновок про вплив тиску на процес деформування полімерів, але не дозволяють описати характер цього впливу на залежності, які можна використати в розрахунках.

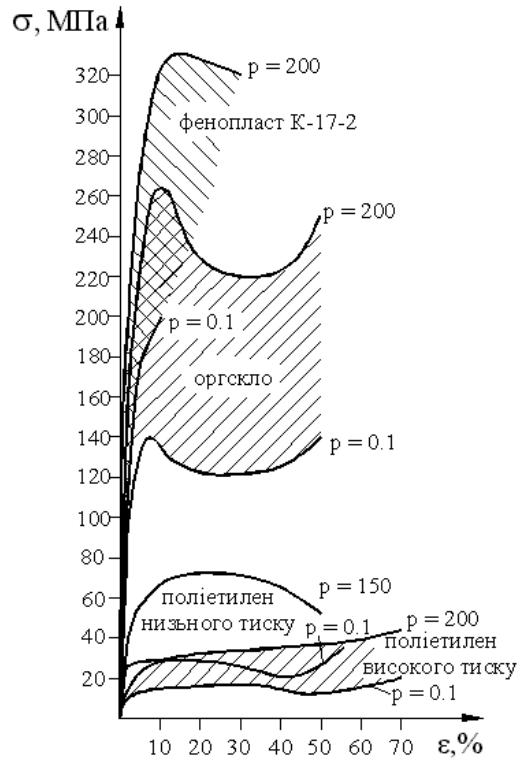


Рис. 6. Залежності між напруженнями та деформаціями для полімерів

Більш суттєво, ніж в металах та полімерах внутрішнє тертя проявляється при деформуванні бетонів, гірських матеріалів, вугілля, зв'язаних ґрунтів. Численні досліді на зразках піщаників провів Bridgman P. [1]. На сьогодні відомо ряд реологічних моделей бетонів та ґрунтів, що враховують вплив тисків на залежності "напруження – деформації" [9].

Перші експериментальні дослідження в області закономірностей формозміни ґрунтів належать А. І. Боткіну. Досліді, проведені А. І. Боткіним, Taylor D. [10], Bishop A. [11], Vyalov S. [12] та багатьма іншими дослідниками по випробуванню зразків зв'язаних ґрунтів в умовах осесиметричного навантаження дають чітку картину про характер впливу внутрішнього тертя на процес деформування цих матеріалів.

Характерні криві деформування глин в узагальнених координатах "інтенсивність дотичних напружень τ_i – інтенсивність зсувів γ_i " показано на рис. 7. Криві побудовано за результатами випробувань на стабілометрах в умовах просторового напруженого стану $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. На рис. 7, а показано експериментальні графіки при збереженні сталості бокового напруження $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$, а на рис. 7, б – середнього стискуючого напруження $\sigma_c = \text{const}$. Аналіз наведених результатів досліджень, а також досліджень інших науковців показує, що процес деформування зв'язаних ґрунтів не можна описати однією ("єдиною") кривою $\tau_i = f(\gamma_i)$. Він характеризується поверхнею $\tau_i = F(\gamma_i, \sigma_c)$, зрізами якої є показані на рис. 7 сімейства кривих. Характер цієї поверхні вивчено недостатньо.

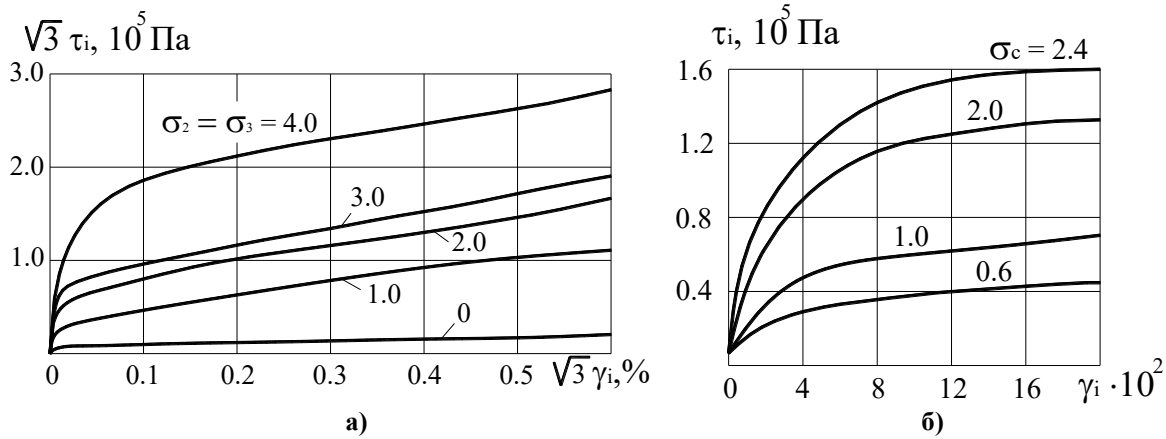


Рис. 7. Криві деформування глин

Найбільш складними для експериментального вивчення закономірностей деформування є сипкі та зернисті матеріали, зразки яких в природному стані не зберігають необхідну для випробувань форму. Спеціально розроблені методики експериментів дозволяють вивчати процес деформування таких матеріалів.

На рис. 8, а показано криві деформування піску, одержані А. І. Боткіним за результатами випробувань зразків в стабілометрі. Аналогічні криві (рис. 8, б) одержані Vyalov S. [12]. Кожен експеримент проводився в умовах збереження сталом величини середнього стискуючого напруження ($\sigma_c = \text{const}$). Аналіз результатів показує, що для кожного значення деформації γ_i інтенсивність дотичних напружень τ_i зростає майже пропорційно величині стискуючого напруження σ_c . Це нагадує прояв закону Амонтона – Кулона в дограничній стадії деформування сипких матеріалів. У випадку пропорційної залежності поверхня деформування стає лінійчатою і за формою нагадує коноід [13].

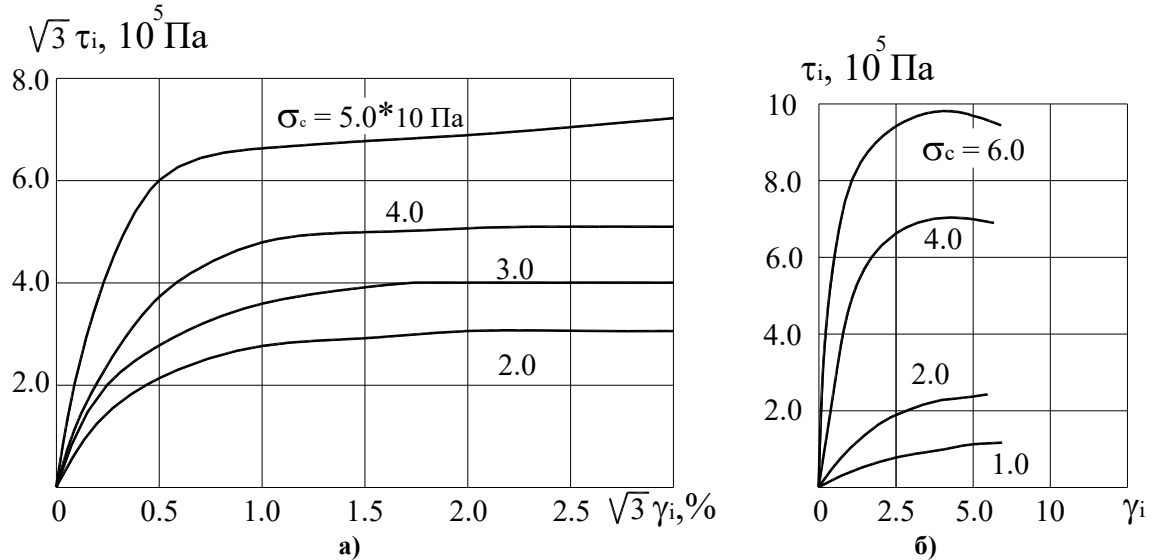


Рис. 8. Криві деформування пісків

Наведені результати експериментальних досліджень процесу деформування матеріалів різних класів в дограничній стадії свідчать про те, що для більшості металів в робочих діапазонах тиску величина середнього стискуючого напруження мало впливає на закономірності їх деформування. Для цього класу матеріалів впливом внутрішнього тертя можна нехтувати, а в розрахунках використовувати закон Гука чи нелінійні співвідношення деформаційної теорії пластичності згідно з гіпотезою “єдиної” кривої деформування.

Для більш широкого класу матеріалів, таких як бетони, гірські породи, ґрунти, технічна кераміка, вугілля, щебень, зерно, пісок, дисперсні матеріали характерно збільшення опору їх деформуванню при зростанні стискуючого напруження. Процес деформування таких матеріалів, які можна віднести до класу матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя характеризується вже не кривою, а поверхнею деформування $\tau_i = F(\gamma_i, \sigma_c)$, характер якої для кожного матеріалу потребує глибокого теоретичного та експериментального вивчення в залежності від ступеню “дискретизації” матеріалу. Найбільш складними і мало вивченими є сипкі матеріали, які займають проміжне положення між твердими тілами і рідинами. Внутрішнє тертя для таких матеріалів має вирішальне значення на будь-якій стадії навантаження не тільки в граничному, але і в дограничному станах. Це можна пояснити тим, що стисливість частинок, що складають кістяк сипких речовин, зневажає мала і деформації матеріалу можна майже повністю віднести за рахунок взаємного зміщення частинок. Цьому зміщенню опираються тільки сили внутрішнього тертя.

Висновки

Проведений аналіз експериментальних даних по вивченню впливу внутрішнього тертя на процес деформування та руйнування матеріалів різних класів дозволяє зробити такі узагальнюючі висновки.

1. За рахунок внутрішнього тертя зростає міцність майже усіх матеріалів при збільшенні величини середнього стискуючого напруження. Для пластичних металів це зростання міцності суттєво проявляється тільки при високих тисках, величини яких виходять за межі діапазону звичайних робочих напружень. Оцінка міцності цих металів в робочому інтервалі тисків може вестись за класичними критеріями, що не включають середні нормальні напруження, наприклад, такими як критерій найбільших дотичних напружень (Треска – Геста), або критерій октаедричних дотичних напружень (Мізеса – Губера).

Інші матеріали можна віднести до класу матеріалів з суттєвим впливом внутрішнього тертя на їх міцність при звичайному рівні робочих напружень. Цей вплив збільшується при зростанні ступеню “дискретизації” матеріалу і в повній мірі проявляється в сипких та зернистих матеріалах. Критерії переходу до граничного стану у цьому випадку крім дотичних напружень повинні включати відношення напружень. До таких критеріїв можна віднести критерії Мора – Кулона, Боткіна – Хошіно, Ягна, Міролюбова, Лебедева.

Предметом подальших досліджень закономірностей руйнування матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя може бути експериментальна перевірка вказаних критеріїв переходу до граничного стану, а також вивчення впливу виду напруженого стану на стабільність критеріїв.

2. Руйнування матеріалу може розглядатись як граничний стан процесу деформування. Тому логічно

припустити, що для матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя в граничному стані слід очікувати аналогічного його прояву в процесі деформування в дограничній стадії. Цей висновок підтверджується описаними попередньо результатами досліджень.

Для пластичних матеріалів в робочому інтервалі напружень впливом внутрішнього тертя на їх деформування можна нехтувати, а сам процес описати “єдиною” кривою деформування $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$.

Закономірності деформування матеріалів з суттєвим проявом внутрішнього тертя є більш складними і в інваріантній формі описуються поверхнею $\sigma_i = F(\varepsilon_i, \sigma_c)$. Особливості цієї поверхні, що відображають вплив внутрішнього тертя, для більшості матеріалів практично не вивчалися. Недостатньо обґрунтовано використання фізично нелінійних розрахункових моделей, що враховують вплив сухого кулонового внутрішнього тертя на процес деформування дискретних матеріалів.

Актуальним напрямком подальших досліджень є проведення експериментів з “некласичними” матеріалами, в першу чергу з сипкими та зернистими, з метою вивчення впливу внутрішнього тертя на процес їх деформування, а також обґрунтування вибору розрахункових моделей, що в достатній мірі враховують цей вплив.

Література

1. Bridgman P. W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture: With Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure / Bridgman P. W. – Harvard University Press, 2nd printing. Reprint, 2013. – 362 p.
2. Pugh H. Mechanical Behavior of Solids at High Pressure / Pugh H. – Elsevier Publishing Company, 1970. – 801 p.
3. Schilling J. Physics of Solids Under High Pressure / Schilling J. – Elsevier Science Ltd., 1981. – 419 p.
4. Loveday J. High-Pressure Physics / Loveday J. – Chapman & Hall, 2012. – 342 p.
5. Crossland B., Dearden W. H. The plastic flow and fracture of a “brittle” material (grey cast iron) with particular reference to the effect of fluid pressure / B. Crossland, W. H. Dearden // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1958. – vol. 172. – p. 805 – 816.
6. Boyer H. E. Atlas of Stress-strain Curves / Boyer H. E. – ASM International; 2nd edition, 2002. – 816 p.
7. Thomas H. C. Mechanical Behavior of Materials / Thomas H. C. – Waveland Pr Inc; 2nd edition, 2005. – 752 p.
8. Ward I. M., Sweeney J. Mechanical Properties of Solid Polymers / Ward I. M., Sweeney J. – John Wiley & Sons, Ltd., – 2013. – 461 p.
9. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / Л. М. Шутенко, О. Г. Рудь, О. В. Кічаєва та ін. ; за ред. Л. М. Шутенка ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 563 с.
10. Taylor D. W. Fundamentals of Soil Mechanics / Taylor D. W. – Literary Licensing, LLC, 2013. – 714 p.
11. Bishop A. W., Henkel D. I. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test / Bishop A. W., Henkel D. I. – London: Edward Arnold Publishers, 2nd ed., 1962. – 288 p.
12. Vyalov S. S. Rheological fundamentals of soil mechanics / Vyalov S. S. – Elsevier Science, 1986. – 576 p.
13. Ковтун В. В. Нелинейные методы расчета обратных засыпок причальных сооружений с учетом эксплуатационных факторов : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.18, 05.23.02 / Ковтун Віталій Васильович. – Хмельницький: ХТИ, 1988. – 321 с.

References

1. Bridgman P. W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture: With Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure / Bridgman P. W. – Harvard University Press, 2nd printing. Reprint, 2013. – 362 p.
2. Pugh H. Mechanical Behavior of Solids at High Pressure / Pugh H. – Elsevier Publishing Company, 1970. – 801 p.
3. Schilling J. Physics of Solids Under High Pressure / Schilling J. – Elsevier Science Ltd., 1981. – 419 p.
4. Loveday J. High-Pressure Physics / Loveday J. – Chapman & Hall, 2012. – 342 p.
5. Crossland B., Dearden W. H. The plastic flow and fracture of a “brittle” material (grey cast iron) with particular reference to the effect of fluid pressure / B. Crossland, W. H. Dearden // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1958. – vol. 172. – p. 805 – 816.
6. Boyer H. E. Atlas of Stress-strain Curves / Boyer H. E. – ASM International; 2nd edition, 2002. – 816 p.
7. Thomas H. C. Mechanical Behavior of Materials / Thomas H. C. – Waveland Pr Inc; 2nd edition, 2005. – 752 p.
8. Ward I. M., Sweeney J. Mechanical Properties of Solid Polymers / Ward I. M., Sweeney J. – John Wiley & Sons, Ltd., – 2013. – 461 p.
9. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / Л. М. Шутенко, О. Г. Рудь, О. В. Кічаєва та ін. ; за ред. Л. М. Шутенка ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : KhNUMH ім. О. М. Бекетова, 2017. – 563 p.
10. Taylor D. W. Fundamentals of Soil Mechanics / Taylor D. W. – Literary Licensing, LLC, 2013. – 714 p.
11. Bishop A. W., Henkel D. I. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test / Bishop A. W., Henkel D. I. – London: Edward Arnold Publishers, 2nd ed., 1962. – 288 p.
12. Vyalov S. S. Rheological fundamentals of soil mechanics / Vyalov S. S. – Elsevier Science, 1986. – 576 p.
13. Kovtun V. V. Nelineinie metody rascheta obratnikh zasipok prichalnikh sooruzhenii s uchetom ekspluatatsionnikh faktorov : dis. ... doktora tekhn. nauk : 05.22.18, 05.23.02 / Kovtun Vitalii Vasilovich. – Khmelnytskii: KhTI, 1988. – 321 p.