

УДК 625.768.5

Гавриш В. С., к.т.н., професор, Тхорук Є. І., к.т.н., доцент, Голотюк М. В., к.т.н., старший викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ОДНОРІДНОГО МЕРЗЛОГО СЕРЕДОВИЩА ЗУБЦЯМИ

Виконано теоретичне дослідження процесу руйнування однорідного мерзлого середовища клиноподібними руйнівними елементами на покриттях доріг.

Ключові слова: льодове покриття, тріщина, руйнування, зубці, розклинювання.

Актуальною є тенденція вибору найбільш раціональних параметрів та форм робочого органу для видалення льодових нанесень з автомобільних доріг та тротуарів, без пошкодження покриття. У більшості випадків це дає можливість значно зменшити енергетичні затрати та збільшити продуктивність і надійність машин [1, 2, 3]. В зв'язку з цим необхідно розглянути питання, які параметри та форму повинен мати робочий орган.

Необхідність якісного очищення покриття в умовах неослабленого адгезійного льоду обумовила використання різного виду механічних пристроїв ударної дії, з клиновими робочими органами. Дослідження силової взаємодії кромки клину з льодом дають можливість визначити їх раціональні форми та геометричні параметри. Одним з перспективних, але ще недостатньо вивчених питань, є дослідження умов утворення в льодовій лідируючій тріщині і взаємодія її вершини з шаром змерзання, а також визначення оптимального кута нахилу кромки з метою створення інтенсивності напруження в її вершині, достатнього для руйнування шару змерзання льоду [4, 5, 7].

Ефективність роботи льодосколочувача суттєво залежить від розстановки зубців в технологічному модулі, яка утворює ту чи іншу систему тріщин руйнування на льодовій поверхні. Тому, вибираючи оптимальну розстановку зубців на робочому органі, можна знизити енергоємність процесу руйнування, збільшити площу руйнування і зменшити розміри фракцій сколеного льоду, забезпечити необхідну якість очищення дорожнього покриття. При впровадженні клиновидного зуба в робоче середовище руйнування відбувається геометричним поділом тіла на окремі частини шляхом розділення по всій поверхні перерізу чи зсувом однієї частини відносно іншої. При цьому центром виникнення руйнування є мікротріщини, розвиток яких під дією динамічних навантажень приводить до виникнення тріщин руйнування [6]. При навантаженні робочого середовища зубцями робочого органу в льодовій утворюється напружена зона, яка виводить його з рівноваги і як наслідок, приводить до руйнування (рис. 1).

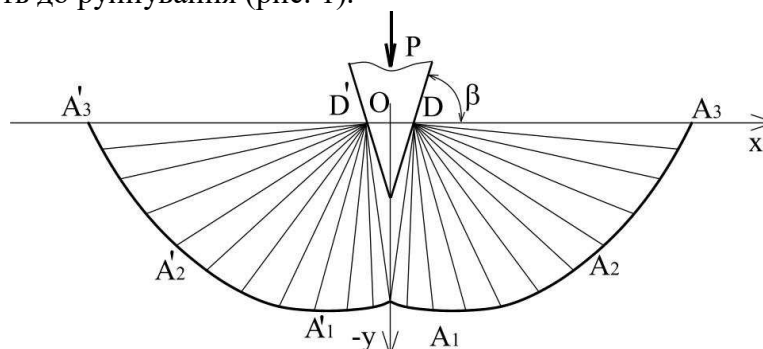


Рис. 1. Схема напруженого стану при зануренні зуба

Будемо вважати, що величина КІН на обох кінцях тріщини є однаковою, незалежно від відстані між зубцями. Розрахункова модель руйнування шару льоду приведена на рис. 2.

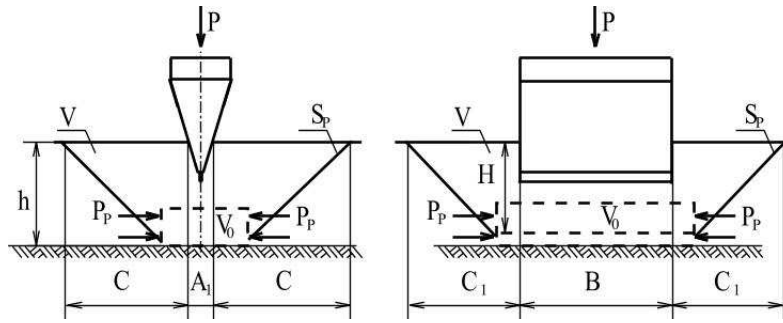


Рис. 2. Розрахункова модель руйнування шару льоду

Рівняння роботи для механічної енергії при руйнуванні можна записати у вигляді:

$$Q = P \cdot \Delta h, \quad (1)$$

де P – сила, з якою зуб діє на лід, Δh – глибина, на яку інструмент упровадиться в лід, або – повздовжня деформація ядра ущільнення (повздовжня по відношенню до напрямку дії сили P). З (1) отримаємо:

$$dQ = dP \cdot \Delta h. \quad (2)$$

Введемо коефіцієнт енергетичного розширення льоду, отримаємо:

$$\gamma = \frac{1}{V_0 \cdot \Delta h} \cdot \frac{dV}{dP}. \quad (3)$$

dP запишемо у вигляді:

$$dP = S \cdot d\sigma, \quad (4)$$

де S – площа контакту зубу з льодом, σ – напруження в льоді під зубом.

За визначенням модуля Юнга:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (5)$$

де ε – відносна деформація:

$$d\varepsilon = \frac{dV}{V_0}, \quad (6)$$

де V_0 – об'єм ядра ущільнення; dV – абсолютна деформація; μ – коефіцієнт Пуассона.

Застосовуючи значення $d\varepsilon$ (6), E (5) і dP (4) в γ (3) отримаємо значення:

$$\gamma = \frac{2\mu}{S \cdot E \cdot \Delta h}. \quad (7)$$

Тоді з урахуванням коефіцієнта енергетичного розширення матеріалу робота буде рівна:

$$dA = \frac{2P_p \cdot V_0 \cdot \mu \cdot dP}{SE} - \frac{V_0 \cdot P_p \cdot dP_p}{E_0}. \quad (8)$$

Після інтегрування визначається робота джерела тріщин, або ядра ущільнення, у який вводять механічну енергію, а ядро ущільнення перетворює її в роботу руйнування

$$A = \int_0^A dA = \int_0^P \frac{2P_p \cdot V_0 \cdot \mu \cdot dP}{SE} - \int_0^{P_p} \frac{V_0 \cdot P_p \cdot dP_p}{E_0}, \quad (9)$$

$$A = \frac{2P_p \cdot V_0 \cdot \mu \cdot P}{SE} - \frac{V_0 \cdot P_p^2}{2E_0}. \quad (10)$$

Об'єм первинного ядра ущільнення:

$$V_0 = \frac{2Q \cdot E}{\sigma_0^2} \quad (11)$$

Навантаження на ядро ущільнення в цьому випадку

$$P_p = \frac{\sigma \cdot S}{S_0}, \quad (12)$$

де σ – межа міцності льоду на розтяг, S – площа поверхні льоду, по якій об'єм V пов'язаний з масивом, тобто – знов утворювана поверхня.

Пов'яжемо цю поверхню з величиною відбиваного об'єму V і глибиною утворюваної воронки H :

$$S = \frac{V \cdot b}{H}, \quad (13)$$

де b – коефіцієнт форми об'єму V лунки (воронки) виколування. S_0 – площа бічної поверхні ядра ущільнення V_0 , на яку діє навантаження P_p з боку масиву породи як реакція на розширення ядра ущільнення. З рисунку 1 витікає, що

$$S_0 = 2B \cdot h + 2A_1 \cdot h = 2h(B + A_1). \quad (14)$$

Застосувавши значення S і S_0 отримаємо

$$P_p = \frac{\sigma \cdot V \cdot b}{2H \cdot h \cdot (B + A_1)}, \quad (15)$$

якщо застосувати значення h , то

$$P_p = \frac{\sigma \cdot V \cdot b \cdot A_1 \cdot \sigma_0^2}{4H \cdot Q \cdot E}. \quad (16)$$

Покажемо зв'язок між розпірним зусиллям P_3 , зусиллям занурення P і кутом загострення клину 2α (рис. 2):

$$P_3 = P \frac{\cos \beta_{mp} \cos(\alpha + \beta_{mp})}{\sin(2\alpha + 2\beta_{mp})}, \quad (17)$$

де β_{mp} – кут тертя матеріалу клину з льодом;

Введемо V_0 і P в рівняння роботи, отримаємо вираз роботи, яка виникає від ядра ущільнення, що утворюється при ударі, як функції енергії удару Q , властивостей льоду і розмірів зуба A_1 і B :

$$A = \frac{2\mu \cdot \sigma \cdot V \cdot \eta \cdot Q \cdot b}{A_1 \cdot H \cdot B \cdot \sigma_0} - \frac{3A_1^2 \cdot \sigma^2 \cdot V^2 \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0 \cdot b^2}{16H^2 \cdot E^2 \cdot Q}. \quad (18)$$

Параметр η введено для врахування роботи вторинного ядра ущільнення із-за відбою на одну вільну поверхню. Рівняння закону збереження енергії для відбою виколом запишемо так:

$$\frac{6\mu \cdot \sigma \cdot V \cdot \eta \cdot Q}{A_1 \cdot H \cdot B \cdot \sigma_0} - \frac{27A_1^2 \cdot \sigma^2 \cdot V^2 \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0}{16H^2 \cdot E^2 \cdot Q} = \frac{\sigma^2 \cdot k \cdot V}{E}. \quad (19)$$

Оскільки робота A достатня для подолання зв'язків об'єму V з масивом, відбувається його відділення від масиву, тобто - відбій. З рівняння (19) визначимо V :

$$V = \frac{16H^2 \cdot E^2 \cdot Q \cdot k}{27A_1^2 \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0^2} \left(\frac{6\mu \cdot \eta \cdot Q}{A_1 \cdot H \cdot B \cdot \sigma_0} - \frac{\sigma \cdot k}{E} \right) \frac{1}{\sigma}. \quad (20)$$

З (20), вважаючи $V=0$, визначаємо мінімальну енергію удару:

$$Q_{\min} = \frac{2A_1 \cdot H \cdot B \cdot \sigma_0 \cdot k \cdot \sigma}{6E \cdot \mu \cdot \eta} \quad (21)$$

Якщо енергія удару менше Q_{\min} , то руйнування льоду на глибину H не відбувається. Представивши вираз (20) у вигляді:

$$V = \frac{32\mu \cdot Q^2 \cdot E^2 \cdot H \cdot \eta}{9A_1^2 \cdot B \cdot \sigma \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0^2} - \frac{32Q \cdot E \cdot H \cdot k}{27A_1^2 \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0^2}, \quad (22)$$

встановимо, що відбитий об'єм льоду V є функцією глибини лунки руйнування H , тому з рівняння:

$$\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{32\mu \cdot Q^2 \cdot E^2 \cdot H \cdot \eta}{9A_1^2 \cdot B \cdot \sigma \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0^2} - \frac{32Q \cdot E \cdot H \cdot k}{27A_1^2 \cdot (1 - 2\mu) \cdot \sigma_0^2} = 0. \quad (23)$$

Визначаємо оптимальне значення:

$$H_{opt} = \frac{3\mu \cdot Q \cdot E \cdot \eta}{A_1 \cdot B \cdot \sigma \cdot k \cdot \sigma_0}. \quad (24)$$

Для нашого випадку H_{opt} має рівнятися товщині шару льоду. При відбої виколуванням руйнування відбувається на глибину H_{opt} при цьому величина відбиваного об'єму досягає

максимальної величини V_{max} , значення V_{max} визначається після підстановки H_{opt} в V (19)

$$V_{max} = \frac{16\mu^2 \cdot Q^3 \cdot E^3 \cdot \eta^2}{A_1^4 \cdot B^2 \cdot \sigma^2 \cdot k \cdot \sigma_0^4} \quad (25)$$

Значення V_{max} зростає при збільшенні енергії удару, зменшується при збільшенні ширини зуба, істотно зменшується при збільшенні міцності льоду. Глибина лунки виколування зростає лінійно при збільшенні енергії удару.

На основі аналітичного рішення задачі значення V_{max} зростає при збільшенні енергії удару, зменшується при збільшенні ширини зуба, істотно зменшується при збільшенні міцності льоду. Глибина лунки виколування зростає лінійно при збільшенні енергії удару.

Враховуючи той факт, що крайні точки клиноподібного руйнівного елемента діють не в одному напрямі, а по півсфері то об'єм льодових утворень, що відбивається за один удар при спільному руйнуванні більше, а енергоємність менше на 20 - 30 %, ніж при одиночного руйнування. Після руйнування об'єму V , ядро ущільнення V_0 розвантажується від навантаження P і повністю руйнується клиноподібним руйнівним елементом.

Достовірність отриманих аналітичних висновків підтверджена багатьма експериментами по визначенню оптимальних кутів загострення зубів і штампів, а також форми льодових ядер ущільнення.

1. Баладинский В. Л. Динамическое разрушение грунтов. / В. Л. Баладинский – К. : 1971. – 226 с.
2. Баренблатт Г. Н. О неустановившемся распространении трещин. / Баренблатт Г. Н., Салганик Р. Л., Черепанов Г. П. // Прикл. математика и механика. – 1962. – № 3 – С. 328–334.
3. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины с рабочим органом интенсифицирующего действия. – М. : Машиностроение, 1981. – 223 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М. : Наука, 1966. – 707 с.
5. Панасюк В. В. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей редакцией Панасюка В. В. – Киев : Наук. думка, 1988. – 620 с.
6. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М. : Наука, 1974. – 640 с.
7. Batke W., Siebeck J., Halama H., Ricci M., Tintrup F. Tooth cap for construction machinery, US Patent D463460, 2002.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С. В. (НУВГП)

Havrych V. S., Candidate of Engineering, Professor, Tkhoruk Y. I., Candidate of Engineering, Associate Professor, Holotyiuk M. V., Candidate of Engineering, Senior Lecturer (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

DESIGN OF PROCESS OF DESTRUCTION OF THE HOMOGENEOUS FROZEN ENVIRONMENT BY INDENTS

Theoretical research of process of destruction of the homogeneous frozen environment is executed by sharp destructive elements on coverages of roads.

Keywords: ice coverage, crack, fracture, teeth, bowing.

Гавриш В. С., к.т.н., професор, Тхорук Е. И., к.т.н., доцент, Голотюк Н. В., к.т.н., старший преподаватель (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ОДНОРОДНОЙ МЕРЗЛОЙ СРЕДЫ ЗУБЦАМИ

Выполнено теоретическое исследование процесса разрушения однородной мерзлой среды клинообразными разрушительными элементами на покрытиях дорог.

Ключевые слова: ледовое покрытие, трещина, разрушение, зубцы, расклинивания.