



*Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка
НАН України
Київ, Україна*

*II Міжнародна науково-технічна
конференція “ДММ- 2020”
Харків, 05-08 жовтня 2020*

Вплив типу та параметрів локальних поверхневих пошкоджень на характеристики коливань стержневих елементів

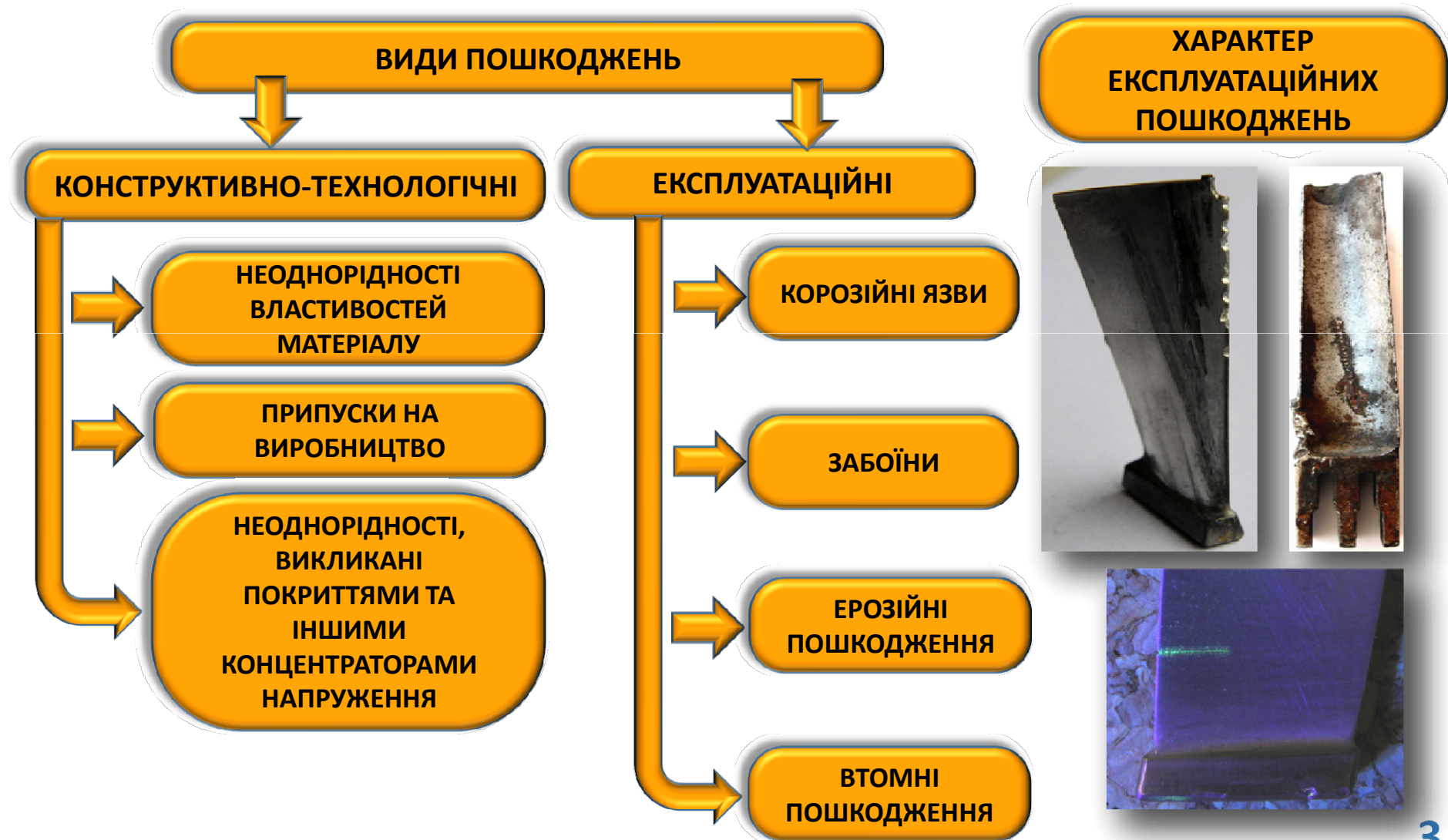
Автори: Матвеєв В.В., Зіньковський А.П.



МЕТА РОБОТИ

Узагальнення комплексних чисельних, аналітичних та експериментальних досліджень з визначення впливу параметрів локальних поверхневих пошкоджень на вібраційні показники їх наявності в стержневих елементах конструкцій, проведених в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України.

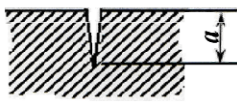
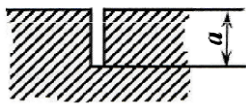
Види пошкоджень конструктивних елементів та причини їх виникнення (на прикладі робочих лопаток турбомашин)



Моделювання пошкоджень в конструктивних елементах

ВІДКРИТІ ТРІЩИНИ

- ПРЯМОКУТНІ ТА КЛИНОВИДНІ ВИРІЗИ;
- ДІЛЯНКИ ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ЖОРСТКІСТЮ;
- ЛІНІЙНІ ПРУЖНІ ЕЛЕМЕНТИ.

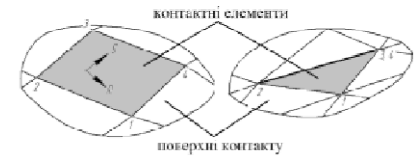
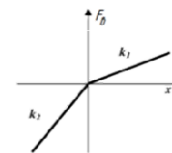


МОНІТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАНЬ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ:

- ВЛАСНИХ ЧАСТОТ І ФОРМ КОЛИВАНЬ;
- РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ ТА АМПЛІТУД КОЛИВАНЬ;
- ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ.

ДИХАЮЧІ ТРІЩИНИ

- ДИСКРЕТНІ МОДЕЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕСИМЕТРИЧНОЇ КУСКОВО-ЛІНІЙНОЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СИЛИ;
- СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.



АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ, ОБУМОВЛЕНИХ КОНТАКТОМ БЕРЕГІВ ТРІЩИНИ:

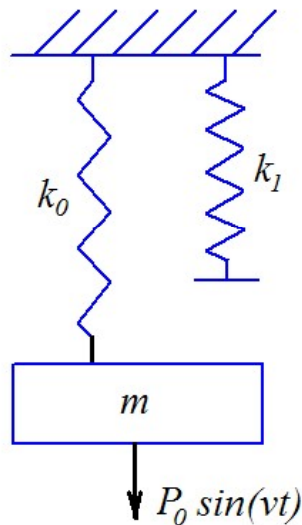
- СПОТВОРЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕМІЩЕННЯ І ПРИШВИДШЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ;
- ВИНИКНЕННЯ СУПЕР- І СУБГАРМОНІЧНИХ РЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ КОЛИВАНЬ.

Методи визначення вібродіагностичних показників наявності пошкодження об'єкту дослідження

	АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ	ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
МОЖЛИВОСТІ	Визначення вібродіагностичних показників наявності тріщини при основному, супер- і субгармонічному резонансах.	Дослідження характеристик вільних та вимушених коливань об'єктів з тріщиною з використанням їх скінченноелементних моделей та рішення контактної задачі для берегів дихаючої тріщини.	- Визначення впливу характеристик пошкодження на спектр власних частот коливань об'єкту дослідження; - Дослідження впливу пошкодження на спектр амплітуд коливань об'єкту, в тому числі при супер- і субгармонічному резонансах.
ТРУДНОЩІ	- Неможливо врахувати зміну форми коливання об'єкту з пошкодженням; - Необхідність знання аналітичних залежностей для коефіцієнту інтенсивності напружень по фронту тріщин.	При дослідженні вимушених коливань об'єктів з дихаючими тріщинами необхідні потужні комп'ютерні ресурси.	- Реєстрація зміни власної частоти коливань лише для значних пошкоджень; - Виникнення «паразитної» гармоніки в сигналі гармонічного збудження коливань; - Амплітуда сили збудження нелінійних резонансів повинна бути в 100 разів вища, ніж для основного резонансу

Методика аналітичного визначення вібродіагностичних показників наявності дыхаючої тріщин

Дискретна модель
деформівного тіла
з дыхаючою тріщиною



Параметр нелінійності

$$\alpha = \frac{k - k_0}{k} = \frac{\chi}{1 + \chi}, \quad k = k_0 + k_1$$

k, k_0 - коефіцієнти жорсткості системи при закритій та відкритій тріщинах відповідно;

$\chi = \frac{\Delta \Pi_{jT}}{\Pi_j}$ - енергетична характеристика пошкодження.

Потенційна енергія деформації непошкодженого стержня по j -й формі при його вимушених коливаннях

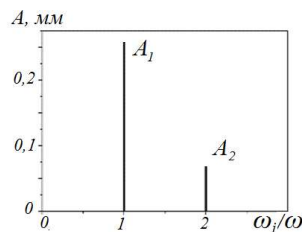
$$\Pi_j = \frac{EI}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 y_j}{dx^2} \right)^2 dx$$

Приріст потенційної енергії деформації стержня по j -й формі в складі решти форм коливань $\Delta \Pi_{jT}$, за наявності тріщини нормального відриву площею S і контуром Γ визначається через коефіцієнт інтенсивності нормальних напружень K_I

$$\Delta \Pi_{jT} = \frac{1}{E} \iint_{(S)} K_I^2 d\Gamma$$

Методика аналітичного визначення вібродіагностичних показників наявності дихаючої тріщин

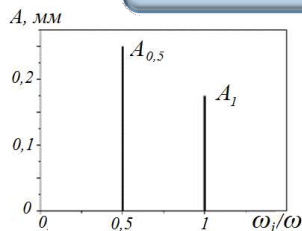
АНАЛІТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРОДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НАЯВНОСТІ ДИХАЮЧОЇ ТРІЩИНИ



Основний резонанс ($\nu = \omega$)

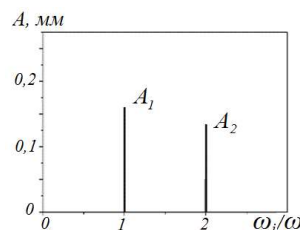
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2\alpha(1 + 0,6\alpha)}{9\pi}$$

Супергармонічний резонанс 2-го порядку ($\nu = 0,5\omega$)



$$\frac{A_{0.5}}{A_1} \cong 0,58 \frac{\alpha}{\delta} \lambda_1 \quad \text{при} \quad \frac{\alpha}{\delta} \leq 1,56; \quad \frac{A_{0.5}}{A_1} \cong 0,725 \lambda_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\delta}} \quad \text{при} \quad \frac{\alpha}{\delta} > 1,56; \quad \text{де} \quad \lambda_1 = y_1(x) / \sum_{i=1}^N y_i(x)$$

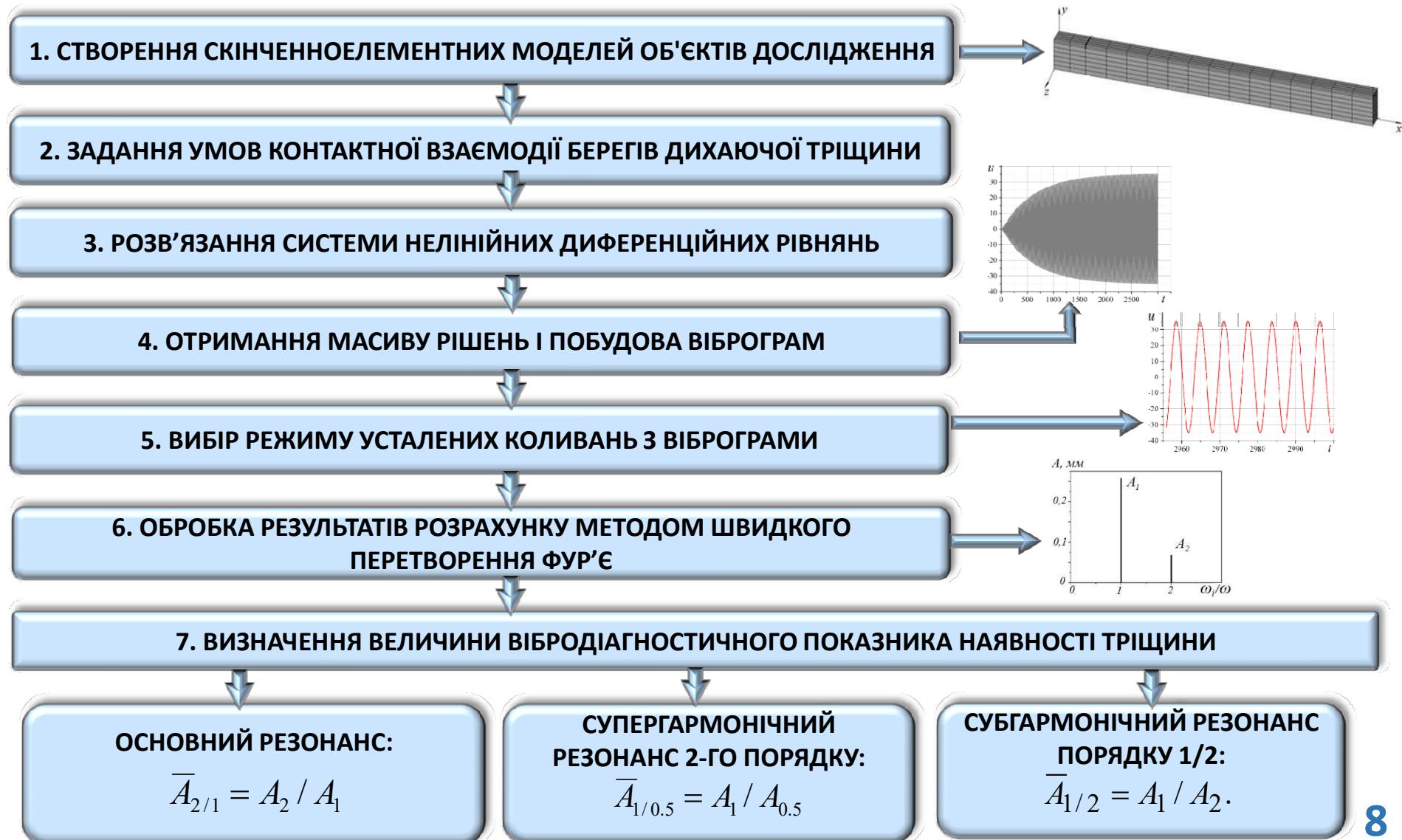
Субгармонічний резонанс порядку $\frac{1}{2}$ ($\nu = 2\omega$)



$$\frac{A_1}{A_2} \cong \frac{4\alpha}{3\delta} \left(\lambda_2^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{8\alpha^2}{9\pi\delta} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad \text{де} \quad \lambda_2 = \sum_{i=1}^N y_i(x) / y_1(x)$$

δ – логарифмічний декремент коливань системи

Алгоритм чисельного дослідження вимушених коливань об'єктів дослідження з дихаючою тріщиною

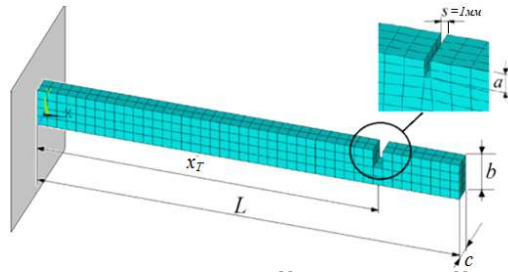




РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Чисельне дослідження впливу місця положення та глибини відкритої тріщини на зміну першої власної частоти згинних коливань стержня

СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ



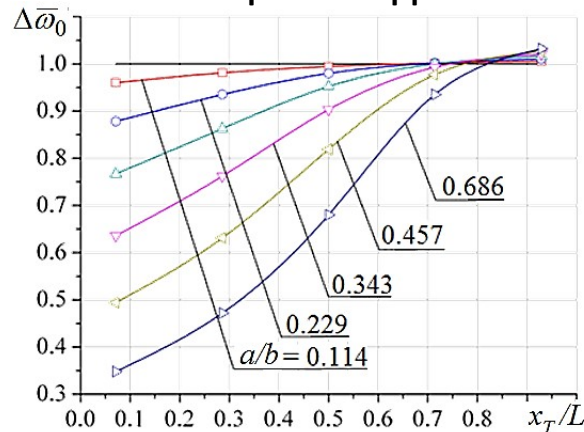
ХАРАКТЕРИСТИКА ЗМІНИ ВЛАСНОЇ ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ТРІЩИНИ

$$\Delta \bar{\omega}_0 = \left| 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) \right|$$

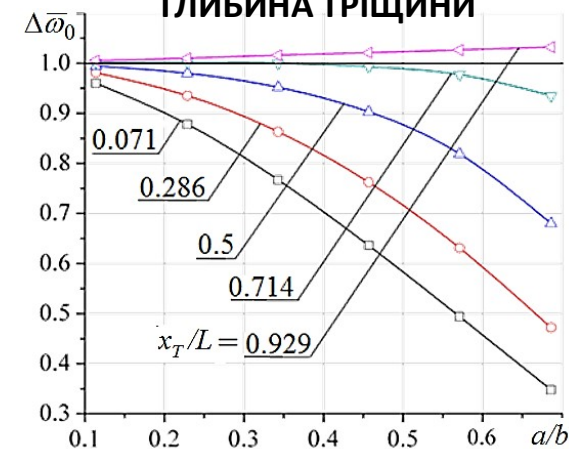
ω_0 , ω - власні частоти коливань непошкодженого об'єкта дослідження та з тріщиною

ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ПЕРШОЇ ВЛАСНОЇ ЧАСТОТИ ЗГИННИХ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ ВІД ПАРАМЕТРІВ ВІДКРИТОЇ ТРІЩИНИ

ПОЛОЖЕННЯ ТРІЩИНИ ПО ДОВЖИНІ СТЕРЖНЯ

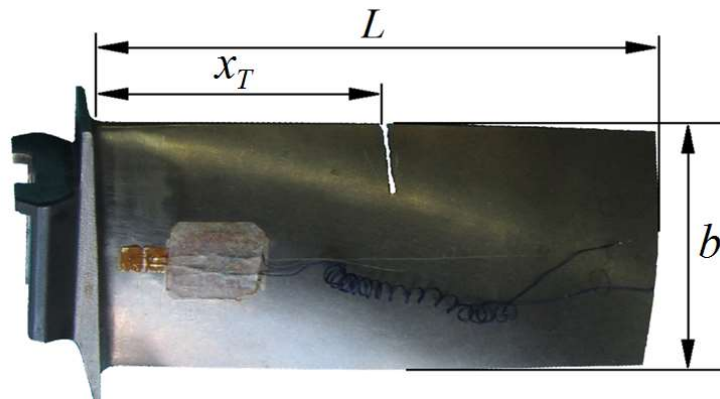


ГЛИБИНА ТРІЩИНИ



- В залежності від місця положення тріщини по довжині стержня та її глибини спостерігається зміна першої власної частоти згинних коливань, що пояснюється впливом пошкодження на жорсткість стержня.
- При певному місці положення тріщини для конкретної його глибини власна частота коливань стержня з пошкодженням і без нього стає однаковою, що пояснюється однаковим впливом пошкодження на пружні та інерційні характеристики стержня.

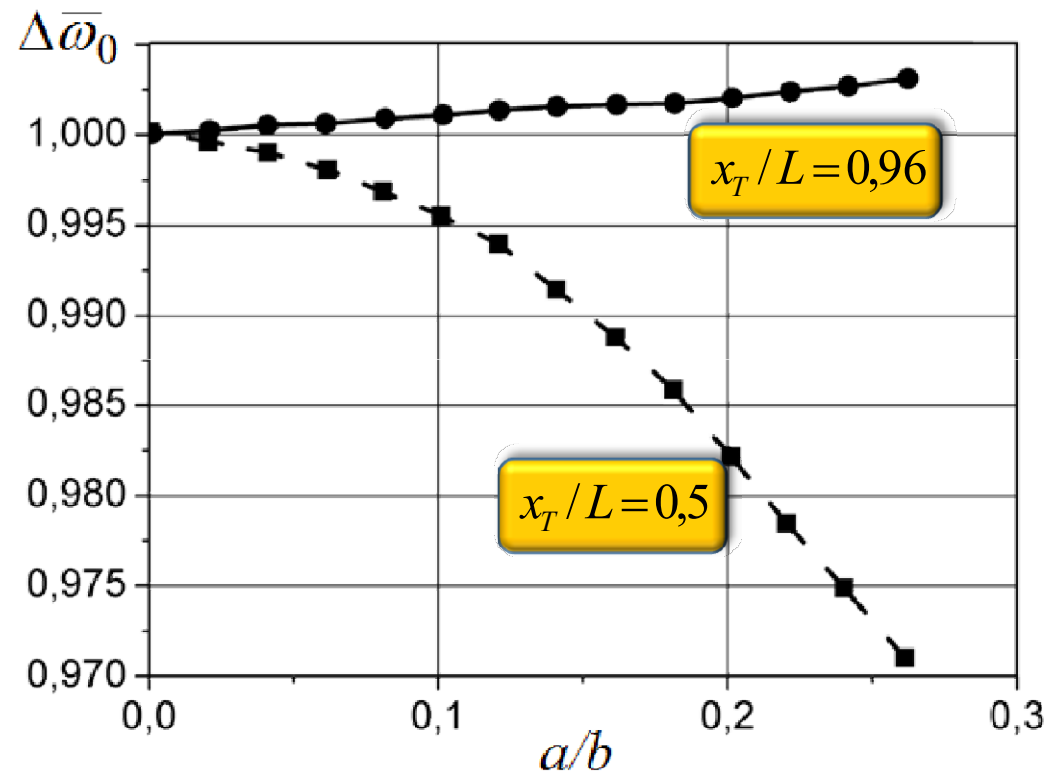
Експериментальне дослідження впливу місця положення відкритої тріщини на зміну першої власної частоти згинних коливань лопатки



$L=175\text{мм}, b=51\text{мм}$

Фізичні властивості
титанового сплаву BT3-1:

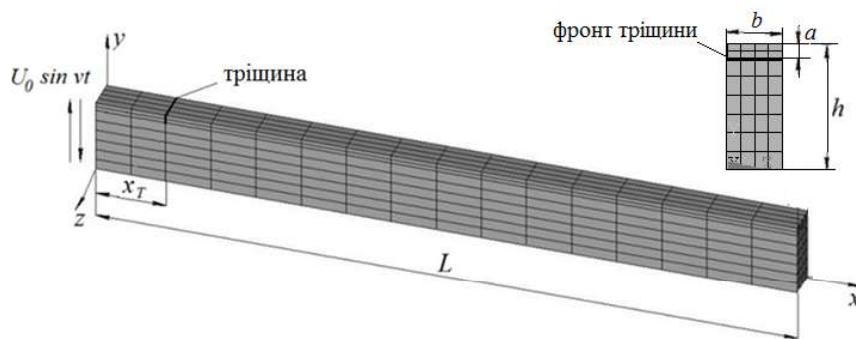
модуль пружності $E=115\text{ГПа}$,
густина $\rho=4500\text{кг/м}^3$.



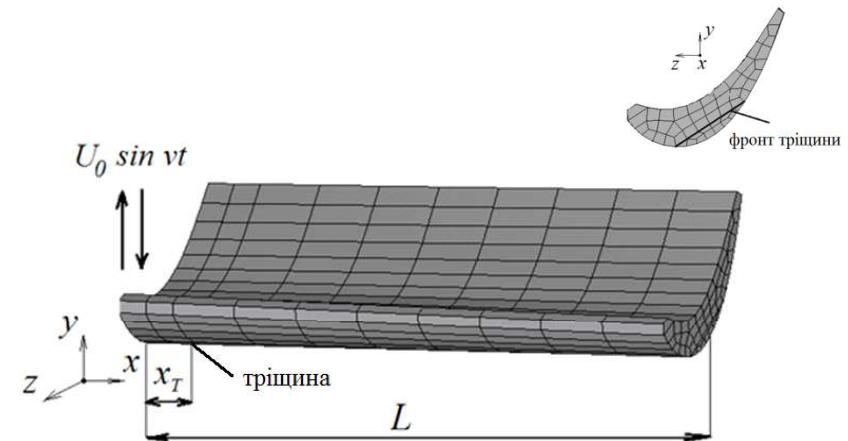
➤ В порівнянні з непошкодженим стержнем, якщо тріщина знаходиться посередині лопатки, то зі збільшенням його глибини перша власна частота згинних коливань зменшується, що пояснюється впливом пошкодження на жорсткість стрижня, а при положенні $x_T/L=0,96$ – збільшується, що пояснюється однаковим впливом паза на пружні та інерційні характеристики стрижня. Цей висновок добре узгоджується з результатами чисельних досліджень.

Скінченноелементні моделі об'єктів досліджень з дихаючою тріщиною

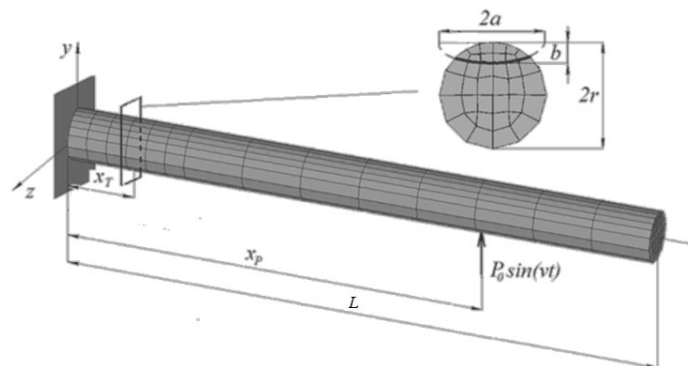
Стержень прямокутного поперечного перерізу з тріщиною



Перо лопатки з тріщиною

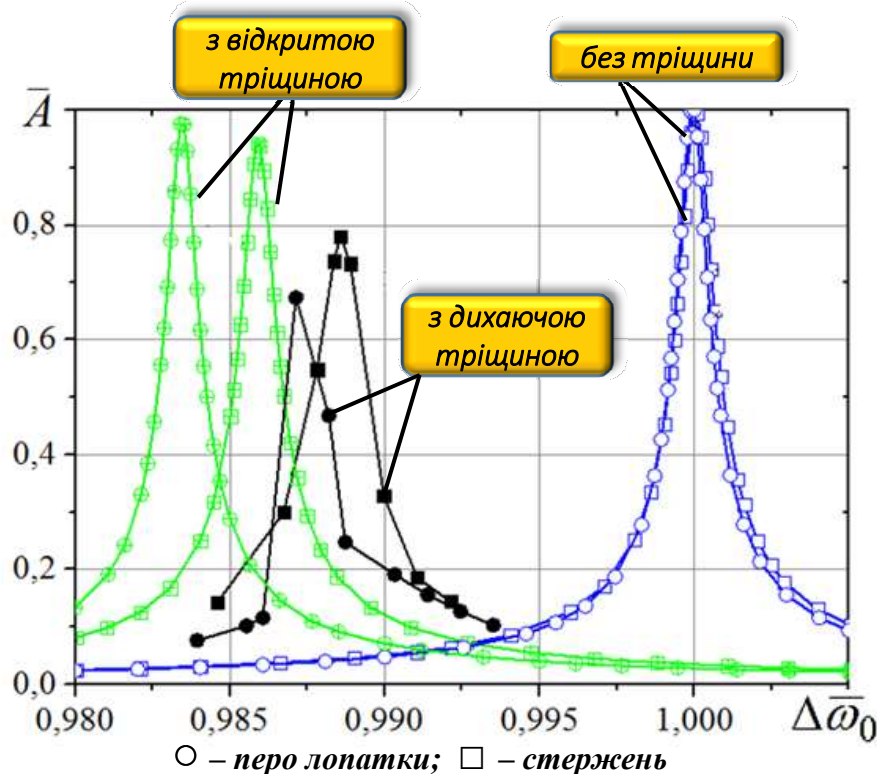


Стержень круглого поперечного перерізу з напівеліптичною тріщиною



Аналіз вимушених коливань лопатки та стрижня з відкритою та дихаючою тріщинами при основному резонансі

АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ



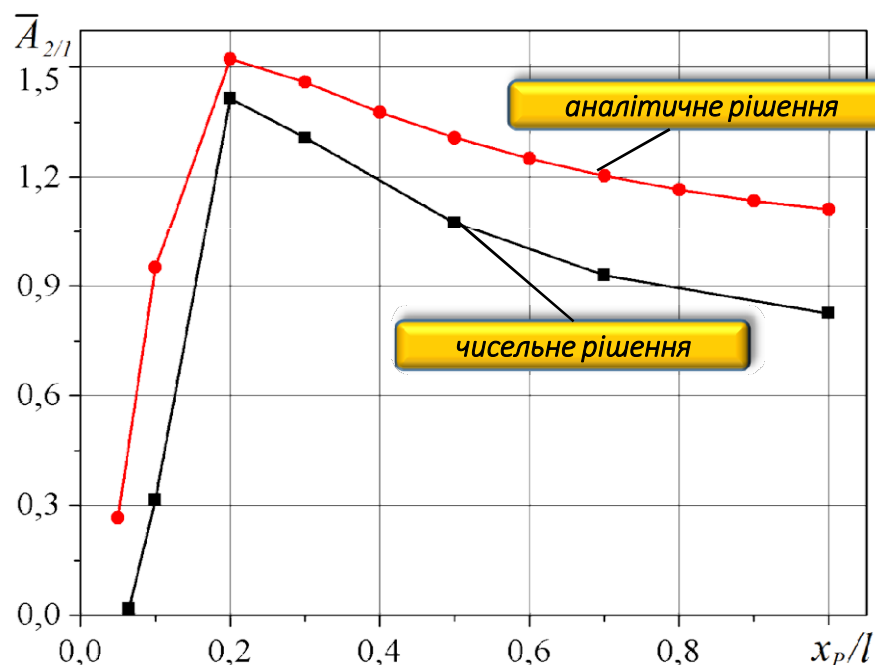
ВІБРОДІАГНОСТИЧНІ ПОКАЗНИКИ НАЯВНОСТІ ДИХАЮЧОЇ ТРІЩИНИ

	Об'єкт дослідження	
	Стержень прямокутного поперечного перерізу	Перо лопатки
Геометричні параметри	$L=86\text{мм}, h=9\text{мм}, b=4\text{мм}$	$L = 86 \text{ мм}$
Параметри тріщини	$a = 0,9 \text{ мм}, x_T=0,1L$	$S_T=0,1S, x_T=0,1L$
Вібродіагностичні показники		
ω/ω_0	0,011	0,0132
$\bar{A}_{2/1} = A_2 / A_1$	0,0042	0,0055
$\bar{A}_{2/1}^a = A_2^a / A_1^a$ (пришвидження)	0,0168	0,022

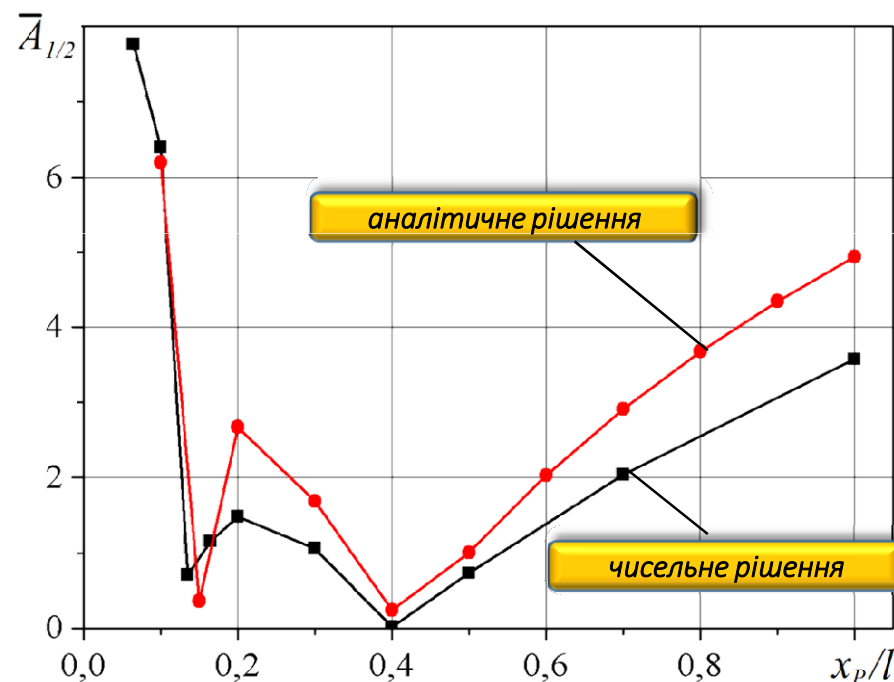
- У випадку втомного пошкодження модель відкритої тріщини дає занижене значення резонансної частоти коливань і таким чином не дозволяє оцінити реальні розміри пошкодження.
- Найбільш ефективним вібродіагностичним показником наявності дихаючої тріщини при основному резонансі є відношення амплітуд домінуючих гармонік пришвидшень.

Залежності вібродіагностичних показників наявності дихаючої тріщини в стрижні круглого поперечного перерізу від місця прикладання змушувальної сили

➤ СУПЕРГАРМОНІЧНИЙ РЕЗОНАНС



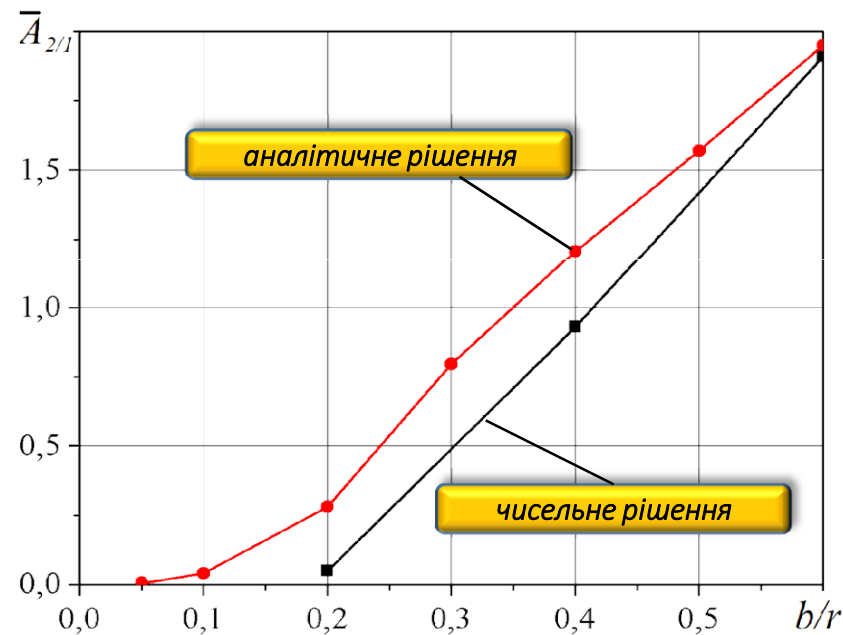
➤ СУБРГАРМОНІЧНИЙ РЕЗОНАНС



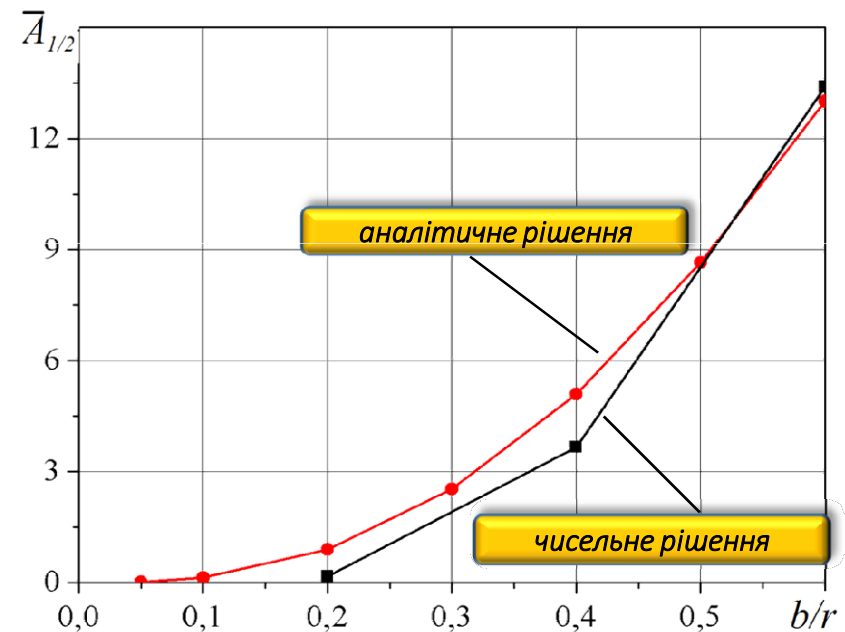
➤ За отриманими залежностями можна визначити місце положення дихаючої тріщини, яке відповідає мінімальному значенню вібродіагностичного показника при супергармонічному та максимальному – при субгармонічному резонансах.

Залежності вібродіагностичних показників наявності дихаючої тріщини в стрижні круглого поперечного перерізу від глибини пошкодження

➤ СУПЕРГАРМОНІЧНИЙ РЕЗОНАНС



➤ СУБГАРМОНІЧНИЙ РЕЗОНАНС



➤ Зі збільшенням глибини тріщини зростають її вібродіагностичні показники, при цьому найбільш ефективним показником є відношення амплітуд домінуючих гармонік при субгармонічному резонансі.

ВИСНОВКИ

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка були розроблені аналітичні, чисельні та експериментальні методики аналізу впливу параметрів відкритих і дихаючих тріщин на характеристики вільних та вимушених коливань стрижневих конструктивних елементах, в тому числі в реальних лопатках турбомашин.

Запропоновані вібродіагностичні показники наявності зазначених пошкоджень об'єктів дослідження на основі зміни їх спектрів власних частот коливань та амплітуд вимушених коливань в залежності від їх збудження.