

## ОЦІНКА РОСТУ ПІВЕЛІПСОЇДНИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН У БУРИЛЬНИХ ТРУБАХ ЗА ЗМІННИХ УМОВ НАВАНТАЖУВАННЯ

Є.І. Крижанівський, В.І. Артим, І.М. Гойсан, В.В. Гриців

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353,  
e-mail: goissan@ukr.net

*Запропоновано загальну фізичну схему росту півеліпсоїдних втомних тріщин на основі аналізу отриманих поверхонь руйнування зламів труб. Наведено уточнені формули розрахунку величин розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень для півеліпсоїдних тріщин за різних схем навантажування. Встановлено зв'язок між втомними довговічностями зразків та відповідними їм розмірними залежностями півеліпсоїдних втомних тріщин за різних схем навантажування.*

Ключові слова: розвиток тріщини, схема навантаження, коефіцієнт інтенсивності напружень, поверхня руйнування.

*Предложена общая физическая схема роста полуэллипсоидных усталостных трещин на основе анализа полученных поверхностей разрушения изломов труб. Приведены уточненные формулы расчета величин размаха коэффициентов интенсивности напряжений для полуэллипсоидных трещин при различных схемах нагрузки. Установлена связь между усталостными долговечностями образцов и соответствующими размерными зависимостями полуэллипсоидных усталостных трещин при различных схемах нагрузки.*

Ключевые слова: развитие трещины, схема нагрузки, коэффициент интенсивности напряжений, поверхность разрушения.

*The scheme of general physical fatigue semi-elliptical crack growth is proposed, based on the analysis of the fracture surfaces of pipes breaks. The revised formula for calculating the values amplitude stress intensity factors shows for cracks semi-elliptical at various schemes load. A connection is established of fatigue durability of samples with their respective dimensional constraints semi-elliptical fatigue cracks under various schemes of the load.*

Key words: the growth of crack, the load scheme, the stress intensity factor, the surface of destruction.

У процесі буріння свердловин в матеріалі елементів бурильних колон накопичуються втомні пошкодження, які спричиняють зародження та подальший ріст тріщин. Проаналізувавши значну кількість втомних досліджень бурильних труб [1, 2], встановили, що розвиток тріщин проходить за визначеними формами фронту їх розповсюдження. Так, аналіз втомних зламів бурильних труб [3] дав змогу виділити дві основні форми фронту розвитку тріщин – кільцевий та півеліпсоїдний.

Досвід буріння засвідчив, що більш небезпечним слід вважати саме півеліпсоїдний фронт втомної тріщини, який призводить до більш швидкого руйнування такого роду обладнання. Тому основна увага в даній статті приділена саме півеліпсоїдним втомним тріщинам.

Оцінка та встановлення основних закономірностей росту втомних півеліпсоїдних тріщин вважається досить складною задачею, оскільки неможливо точно спрогнозувати, як пройде процес руйнування в тій чи іншій ситуації. На кінетику поширення втомних тріщин впливають численні конструктивні, технологічні та структурні чинники, які діють за різних схем та умов навантажування.

Значний внесок у даному напрямі дослідження зробили такі відомі науковці, як Одінг І.А., Серенсен С.В., Іванова В.С., Трощенко В.Т., Школьник Л.М. та інші [4, 5, 6].

За реальних умов експлуатації бурильна колона піддається дії змінних у часі циклічних навантажень. Все це повною мірою стосується і

бурильних труб. Тому в подальших дослідженнях автори [7] намагались максимально відтворити умови навантажування, близькі до експлуатаційних. В результаті випробування проводили за багатоступеневого навантажування, яке імітувало можливі варіанти зміни даних умов навантаження.

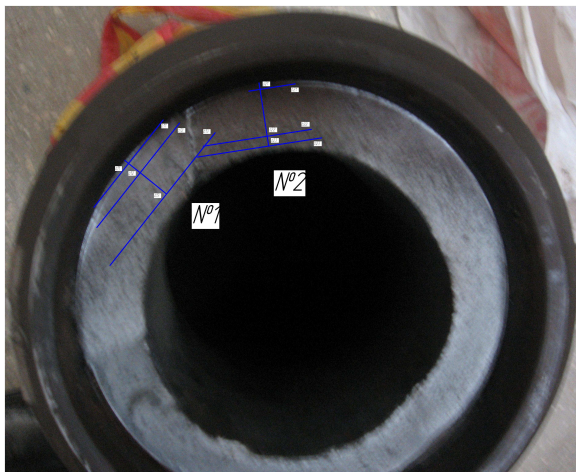
Дослідними об'єктами слугували поперечно отримані втомні злами зразків бурильних труб ТБВ 140×11 «Л» [7]. Згідно з наведеними на рисунку 1 фрактографіями зламів труб, отриманих за різних схем навантажування, на поверхні руйнування виявлено велику кількість півеліпсоїдних втомних тріщин.

Для зламу зразка №1 (рис. 1, а), процес навантажування якого імітував сталі умови роботи бурильної труби на інтенсивно навантаженої ділянці свердловини, характерним є наявність великої кількості півеліпсоїдних тріщин, що зароджувались з різних осередків руйнування. Специфікою даного зламу є те, що на певній стадії втомного руйнування переважна більшість тріщин припинила свій подальший ріст, і тільки одна з них стала домінуючою та переросла у магістральну. Саме вона і спричинила повний долам досліджуваного зразка.

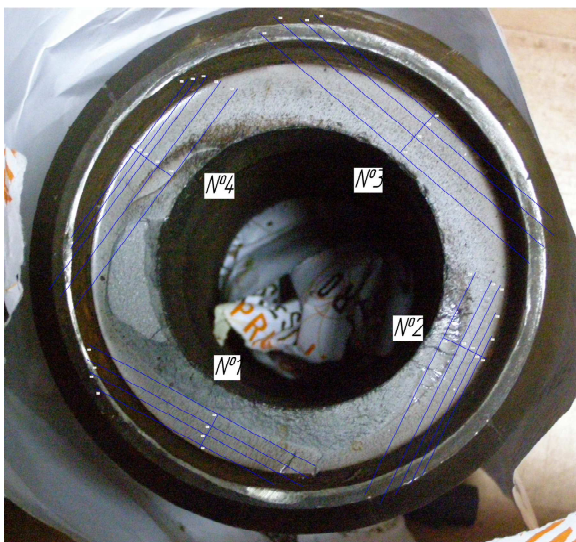
Специфікою роботи зразка №2 є поступове підвищення інтенсивності навантаження. На поверхні отриманого втомного зламу (рис. 1, б) спостерігали домінуючу односторонню півеліпсоїдну тріщину.



а)



б)



в)

а – №1; б – №2; в – №3

**Рисунок 1 – Загальний вигляд зламів зразків труб, отриманих за різних схем навантаження з розміщенням областей розвитку півеліпсоїдних втомних тріщин**

Що ж до зразка №3 (рис. 1, в), схема навантаження якого передбачала поступове зниження інтенсивності навантаження, на поверхні зламу отримали кільцевий фронт розвитку втомних тріщин.

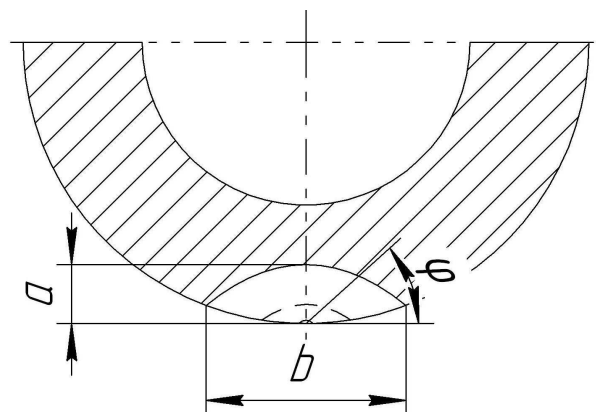
Як свідчать результати проведених втомних досліджень натурних зразків труб, особливістю механізму зародження та подальшого росту втомних тріщин є виникнення кількох осередків руйнування при різних фронтах розвитку тріщин, незалежно від схеми навантаження.

Півеліпсоїдний фронт розвитку втомних тріщин характеризується наявністю великого діапазону осередків руйнування. В подальшому процесі руйнування відбувається об'єднання таких осередків тріщин та формування магістральної тріщини. Перехід втомної тріщини в магістральну здійснюється за рахунок об'єднання «сусідніх» півеліпсоїдних систем. Усі інші системи тріщин значно втрачають у швидкості власного росту, або зовсім припиняють свій розвиток.

Особливістю кільцевого фронту розвитку тріщин є об'єднання таких систем півеліпсоїдних тріщин уже на початкових стадіях втомного руйнування зразка. Після досягнення повного перекриття півеліпсоїдних систем формується кільцевий фронт розвитку тріщин, який рівномірно підростає по всьому перерізу зразка.

Така фізична схема росту півеліпсоїдних втомних тріщин підтверджується отриманими поверхнями руйнування зламів труб.

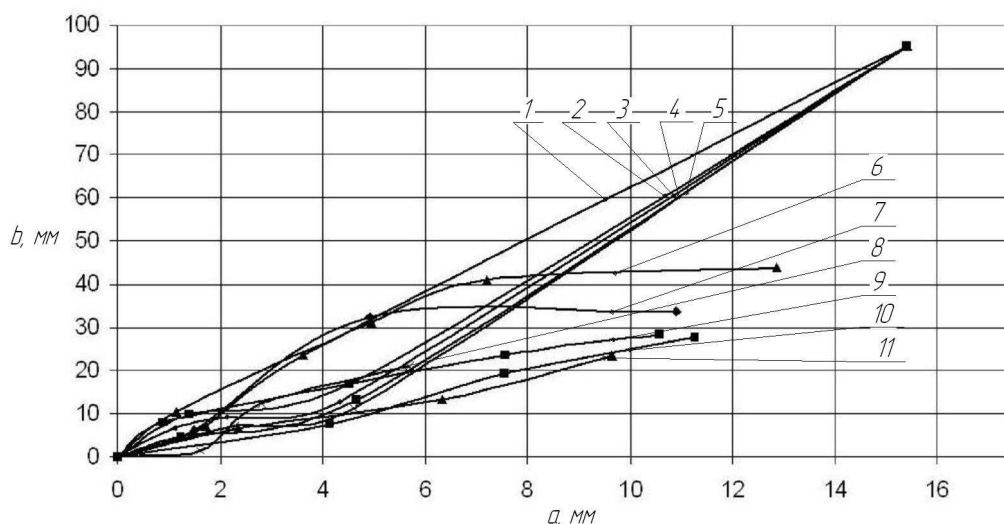
Розміри півеліпсоїдних втомних тріщин (рис. 2) встановлені з допомогою оптичних методів. Довжину  $b(\varphi = 0^\circ)$  та глибину  $a(\varphi = 90^\circ)$  кожної втомної півеліпсоїдної тріщини вимірювали на основі слідів ліній фронту.



**Рисунок 2 – Схема перерізу труби з півеліпсоїдною втомною тріщиною**

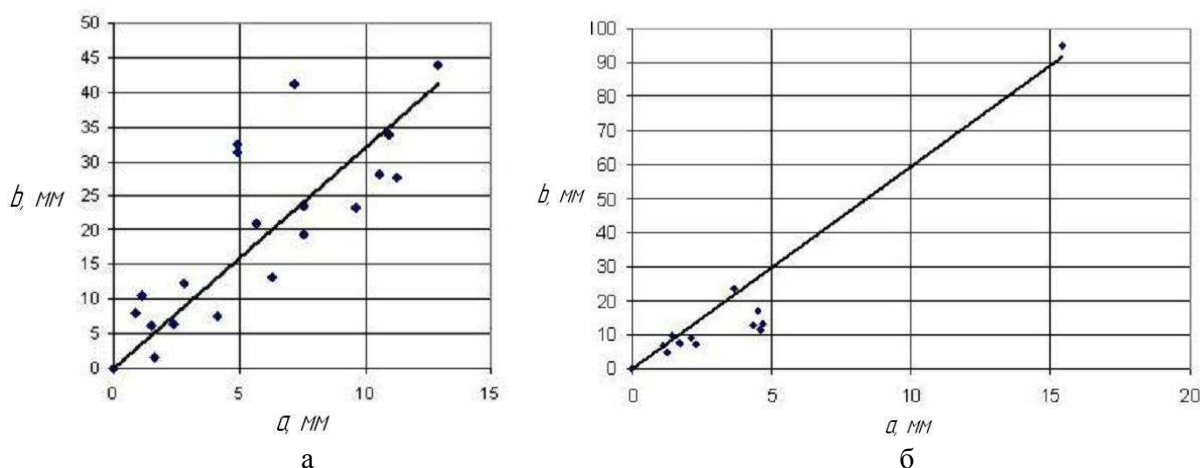
Розглянемо більш детально перший випадок – сталі умови роботи бурильної труби на інтенсивно навантаженій ділянці свердловини.

Провівши відповідні заміри величин півеліпсоїдних втомних тріщин, встановили залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин як функції від відповідних їм глибин  $b = f(a)$  за відповідної схеми навантаження (рис. 3).



1, 2, 3, 4, 5 – півеліпсоїдні втомні тріщини, які, об'єднавшись, дали початок магістральній тріщині;  
6, 7, 8, 9, 10, 11 – півеліпсоїдні втомні тріщини, які припинили свій подальший ріст

Рисунок 3 – Графічні залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин від відповідних їм глибин  $b = f(a)$



а – півеліпсоїдні втомні тріщини, які припинили свій подальший ріст;  
б – півеліпсоїдні втомні тріщини, які, об'єднавшись, дали початок магістральній тріщині

Рисунок 4 – Апроксимовані залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин  $b$  від відповідних їм глибин  $a$  за 1-ої схеми навантажування

Розвиток півеліпсоїдних втомних тріщин за імітації сталої роботи труби на інтенсивно навантаженій ділянці свердловини має чітко виражений лінійний характер. Так, умовно поділивши півеліпсоїдні осередки за темпом розвитку, отримали характерні закономірності росту довжин втомних тріщин в залежності від їх глибин (рис. 4).

Апроксимовані дослідні дані відповідно для двох окремих випадків описали наступними рівняннями:

$$b = 3,2023 \cdot a \quad (1)$$

та

$$b = 5,9471 \cdot a. \quad (2)$$

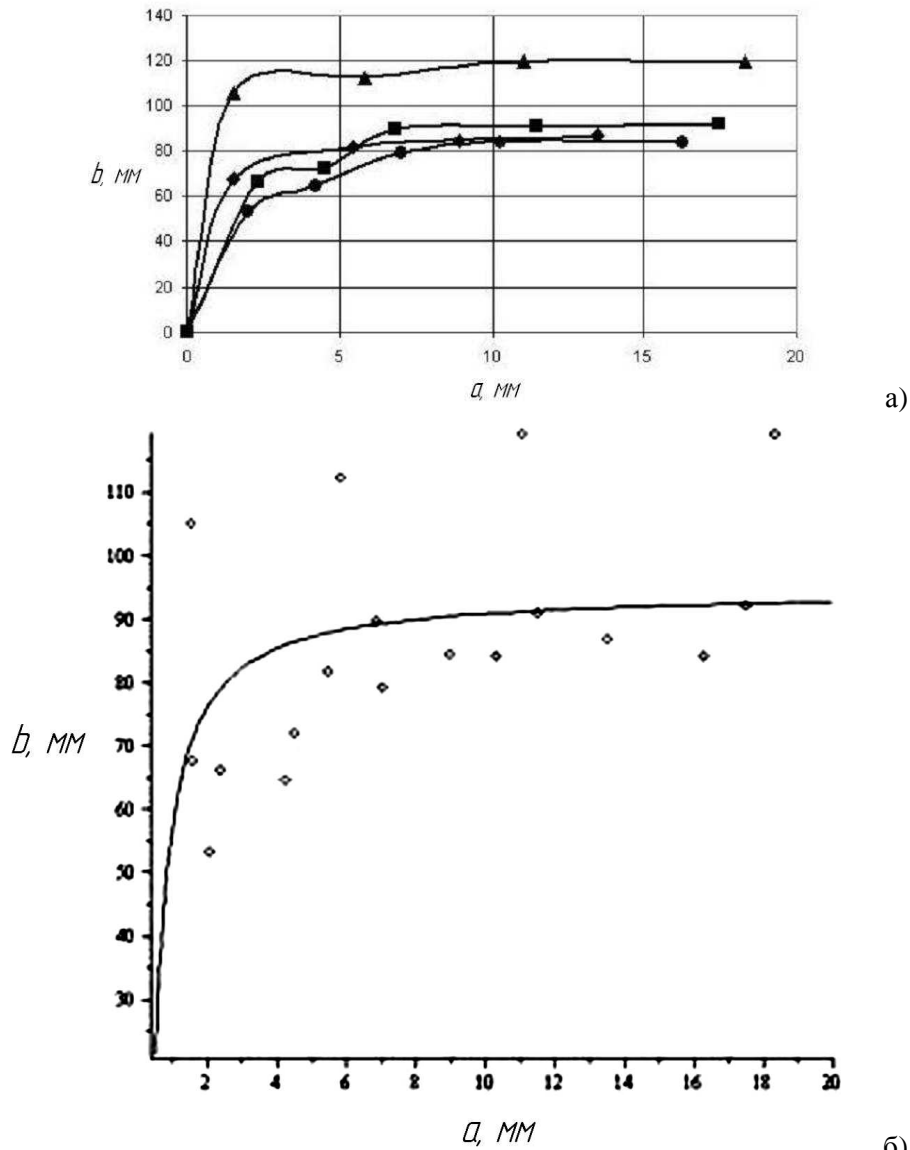
Щодо другого варіанту схеми навантажування – поступового збільшення інтенсивності

навантаження, – то розвиток півеліпсоїдних втомних тріщин та їх апроксимуюча крива мають вигляд (рис. 5).

Проаналізувавши дослідні дані особливостей кінетики поширення півеліпсоїдних втомних тріщин за такої схеми навантажування, результуюча апроксимована крива запишеться такою математичною рівністю:

$$b = 94,532 - 36,569 \cdot a^{-1}. \quad (3)$$

Характерною рисою розвитку півеліпсоїдних тріщин за підвищення інтенсивності навантажування в процесі роботи труб є достатньо значне співвідношення розмірів  $b/a$  таких півеліпсоїдів уже з ранніх стадій втомного руйнування. В подальшому, досягнувши певної величини, довжина тріщини  $b$  практично залиша-



*a* – експериментальні криві; *b* – апроксимована крива

**Рисунок 5 – Графічні залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин від відповідних їм глибин  $b = f(a)$  за другої схеми навантажування**

ється сталою. Отримані результати відповідають запропонованій фізичній моделі росту таких півеліпсоїдів.

Результатом експлуатації буринних труб за умов поступового зменшення інтенсивності навантажування є отримання графічних залежностей  $b = f(a)$  (рис. 6), апроксимована крива яких описана наступним виразом:

$$b = 15,8397 \cdot a^{1/3}. \quad (4)$$

Визначення швидкості росту втомної тріщини найчастіше проводять за допомогою рівняння Періса [8], яке має вигляд:

$$v = \alpha \cdot \Delta K^\beta, \quad (5)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  – експериментальні сталі [9].

Величину розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  для півеліпсоїдної тріщини доцільно визначати за допомогою функції Ірвіна [10]:

$$\Delta K = M \cdot \frac{\Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\Gamma} \cdot \left( \sin^2 \varphi + \frac{a^2}{b^2} \cdot \cos^2 \varphi \right)^{1/4}, \quad (6)$$

де:  $M$  – поправочний коефіцієнт кінцевих розмірів [11];

$\Delta \sigma$  – розмах напружень циклу;

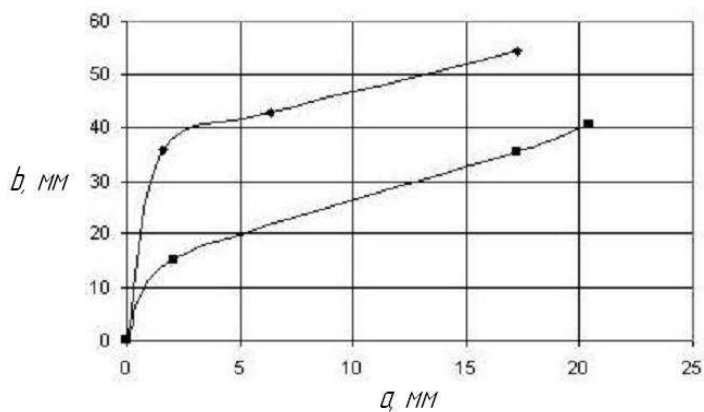
$b$ ,  $a$  – довжина та глибина півеліпсоїдної тріщини відповідно;

$\varphi$  – кут поширення фронту півеліпсоїдної тріщини;

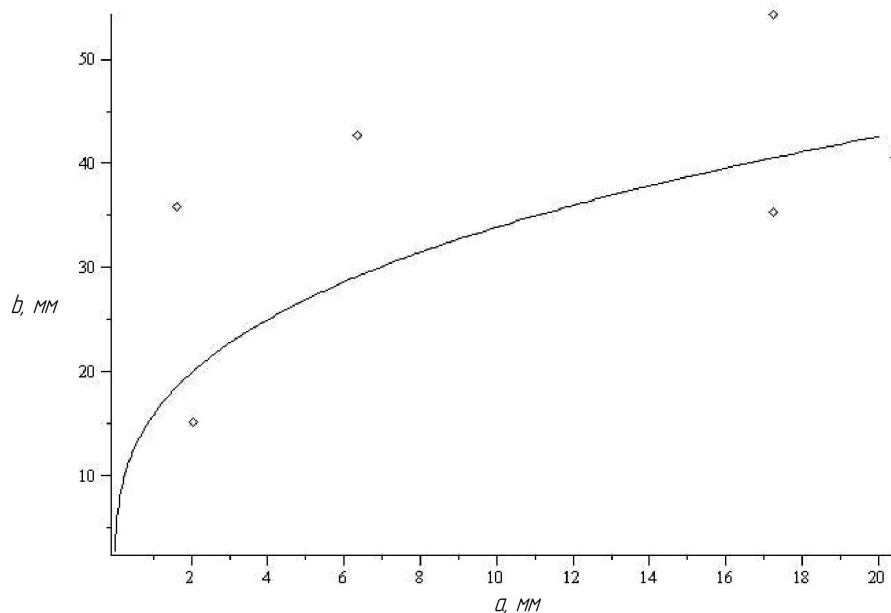
$\Gamma$  – еліптичний інтеграл II-го роду:

$$\Gamma = \int_0^{\pi/2} \left( 1 - \frac{b^2 - a^2}{b^2} \cdot \sin^2 \varphi \right)^{0.5} d\varphi. \quad (7)$$

Виходячи з виразу (7), розв'язок еліптичного інтегралу запишеться так:



а)



б)

*a* – експериментальні криві; *b* – апроксимована крива

**Рисунок 6 – Графічні залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин від відповідних їм глибин  $b = f(a)$  за третьої схеми навантаження**

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{b^2 - a^2}{b^2} \cdot \sin^2 \varphi} d\varphi = \\ &= \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{(-b^2 + a^2) \cdot \sin^2 \varphi} \cdot (-4 \cdot b^2 + 2 \cdot \sqrt{2} \times \\ &\times \sqrt{\frac{2 \cdot b^2 - \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot b^2 + \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot a^2}{b^2}} \cdot b^2 - \\ &- \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot b^2 - \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot b^2 + \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot a^2}{b^2}} \times \\ &\quad \times \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot b^2 + \\ &+ \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot b^2 - \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot b^2 + \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot a^2}{b^2}} \times \\ &\quad \times \pi \cdot \sin^2 \varphi \cdot a^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Підставивши (2) у рівняння (8), отримаємо розв'язок інтегралу у вигляді:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{-1}{a^2} \cdot \left( 0,00308727 \cdot (-141,472 \cdot a^2 + \right. \\ &+ 100,0358 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 - 4,795 \cdot a^2}{a^2}} - \\ &- 246,828 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 - 4,795 \cdot a^2}{a^2}} \cdot a^2 + \\ &\left. + 6,97886 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 - 0,1395 \cdot a^2}{a^2}} \cdot a^2 \right) = \\ &= -\frac{0,00308727 \cdot (-131,95 \cdot a^2 - 245,41 \cdot a^2)}{a^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тоді розмах коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  для першого варіанту схеми навантаження при  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  запишеться так:

$$\Delta K = 0,85837 \cdot M \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}. \quad (10)$$

Розглядаючи другий випадок схеми навантаження і підставивши відповідно (3) у (8), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Gamma = & -\left(-8,936299024 \cdot 10^9 \cdot a^2 + 6,913881416 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,337291761 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^6 \cdot a^4\right)^{-1} \cdot (0,0001 \times \\ & \times (5,95533874 \cdot 10^{13} \cdot a^2 - 4,609255199 \cdot 10^{13} \cdot a + \\ & + 8,915280190 \cdot 10^{12} + 2,404543779 \cdot 10^{13} \times \\ & \times \left[ -1,02015896 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 7,892817866 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,526638901 \cdot 10^9 + 3,14159 \cdot 10^6 \cdot a^4 \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{-1/2} \cdot a^2 - 1,86036 \cdot 10^{13} \times \\ & \times \left[ -1,020159 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 7,89282 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,5266389 \cdot 10^9 + 3,14159 \cdot 10^6 \cdot a^4 \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{-1/2} \cdot a + 3,59833 \cdot 10^{12} \times \\ & \times \left[ -1,020159 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 7,89282 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,5266389 \cdot 10^9 + 3,14159 \cdot 10^6 \cdot a^4 \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{1/2} - 7,4048 \cdot 10^9 \times \\ & \times \left[ -1 \cdot (-1,7873 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 1,38278 \cdot 10^{10} \cdot a - \right. \\ & \left. -2,6746 \cdot 10^9 + 3,1416 \cdot 10^6 \cdot a^4) \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{1/2} \cdot a^4). \quad (11) \end{aligned}$$

Для зручності використання еліптичний інтеграл запишемо як:

$$\begin{aligned} \Gamma = & -\left(-8,936299024 \cdot 10^9 \cdot a^2 + 6,913881416 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,337291761 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^6 \cdot a^4\right)^{-1} \cdot (0,0001 \times \\ & \times (5,95533874 \cdot 10^{13} \cdot a^2 - 4,609255199 \cdot 10^{13} \cdot a + \\ & + 8,915280190 \cdot 10^{12} + 2,404543779 \cdot 10^{13} \cdot k_1 \cdot a^2 - \\ & -1,86036 \cdot 10^{13} \cdot k_1 \cdot a + 3,59833 \cdot 10^{12} \cdot k_1 - \\ & -7,4048 \cdot 10^9 \cdot k_2 \cdot a^4)), \quad (12) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} k_1 = & \left[ -1,020159 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 7,89282 \cdot 10^9 \cdot a - \right. \\ & \left. -1,5266389 \cdot 10^9 + 3,14159 \cdot 10^6 \cdot a^4 \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{1/2}; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_2 = & \left[ -1 \cdot (-1,7873 \cdot 10^{10} \cdot a^2 + 1,38278 \cdot 10^{10} \cdot a - \right. \\ & \left. -2,6746 \cdot 10^9 + 3,1416 \cdot 10^6 \cdot a^4) \right] \times \\ & \times \left[ (94532 \cdot a - 36569)^2 \right]^{1/2}. \quad (14) \end{aligned}$$

$$\text{Звідси, при } \varphi = \frac{\pi}{2},$$

$$\begin{aligned} \Delta K = & -10000 \cdot M \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot (-8,936299 \cdot 10^9 \cdot a^2 + \\ & + 6,91388 \cdot 10^9 \cdot a - 1,33729 \cdot 10^9 + 10^6 \cdot a^4) \times \\ & \times \left( 5,96 \cdot 10^{13} \cdot a^2 - 4,61 \cdot 10^{13} \cdot a + 8,92 \cdot 10^{12} + \right. \\ & + 2,41 \cdot 10^{13} \cdot k_1 \cdot a^2 - 1,86 \cdot 10^{13} \cdot k_1 \cdot a + \\ & \left. + 3,6 \cdot 10^{12} \cdot k_1 - 7,41 \cdot 10^9 \cdot k_2 \cdot a^4 \right)^{-1}. \quad (15) \end{aligned}$$

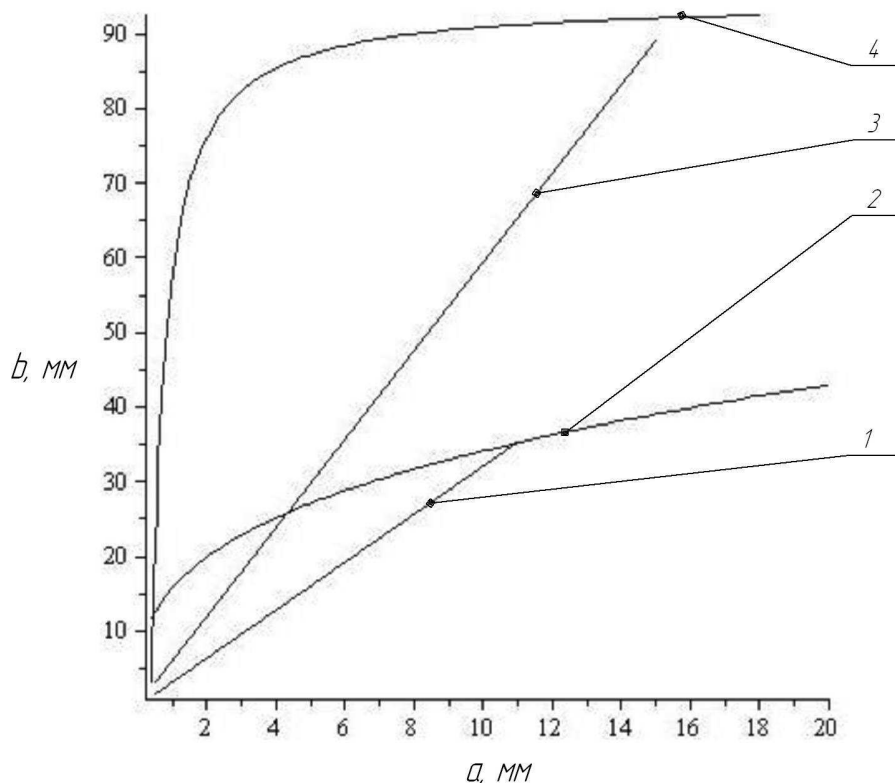
Щодо третього варіанту схеми навантаження при  $b = 15,8397 \cdot a^{1/3}$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} \Gamma = & \frac{1}{(-250,8961 \cdot a^{2/3} + a^2)} \cdot 0,166667 \times \\ & \times (-1003,585 \cdot a^{2/3} + 709,6413 \times \\ & \times \sqrt{\frac{2 \cdot a^{2/3} - 3,1416 \cdot a^{2/3} + 0,0125 \cdot a^2}{a^{2/3}} \cdot a^{2/3} -} \\ & -1114,702 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^{2/3} - 3,1416 \cdot a^{2/3} + 0,0125 \cdot a^2}{a^{2/3}} \cdot a^{2/3} +} \\ & + 4,44288 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^{2/3} - 0,0125 \cdot a^2}{a^{2/3}} \cdot a^2}) = \\ & = \left( 4 \cdot 10^{-10} \cdot (5,227 \cdot 10^{13} \cdot a^{2/3} + \right. \\ & + 4,219 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{-2,854 \cdot 10^9 + 3,13 \cdot 10^7 \cdot a^{4/3}} \cdot a^{2/3} - \\ & \left. -4,628 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^5 - 3130 \cdot a^{4/3}} \cdot a^2 \right) \times \\ & \times \left( 31362 \cdot a^{2/3} - 125 \cdot a^2 \right)^{-1}. \quad (16) \end{aligned}$$

$$\text{Звідси випливає, що за умови } \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned} \Delta K = & 25 \cdot 10^8 \cdot M \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot (31362 \cdot a^{2/3} - 125 \cdot a^2) \times \\ & \times \left( 5,227 \cdot 10^{13} \cdot a^{2/3} + 4,22 \cdot 10^8 \times \right. \\ & \times \sqrt{-2,854 \cdot 10^9 + 3,13 \cdot 10^7 \cdot a^{4/3}} \cdot a^{2/3} - \\ & \left. -4,628 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^5 - 3130 \cdot a^{4/3}} \cdot a^2 \right). \quad (17) \end{aligned}$$

Отримані результати обчислень  $\Delta K$  за різних схем навантаження дають змогу уточнити наявні розрахунки та прив'язати їх до умов роботи труб, які найбільш близько відповідають експлуатаційним, що і слугувало основною метою роботи.



- 1 – за сталих умов роботи бурильної труби на інтенсивно навантаженій ділянці свердловини (півеліпсоїдні тріщини, які припинили свій подальший ріст);  
 2 – за поступового зменшення інтенсивності навантаження;  
 3 – за сталих умов роботи бурильної труби на інтенсивно навантаженій ділянці свердловини (півеліпсоїдні тріщини, які, об'єднавшись, дали початок магістральній тріщині);  
 4 – за поступового підвищення інтенсивності навантаження

**Рисунок 7 – Апроксимовані графічні залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин від відповідних їм глибин  $b = f(a)$  за різних схем навантаження**

Оцінивши загальну картину щодо розвитку півеліпсоїдних втомних тріщин за різних схем навантаження (рис. 7), виявили своєрідні особливості їх процесу підростання.

Так, в роботі [7] експериментальні зразки бурильних труб показали різну довговічність:

- найменшу – за схеми поступового зменшення інтенсивності навантаження;
- середню – за сталих умов роботи бурильної труби на інтенсивно навантаженій ділянці свердловини;
- найбільшу – за поступового підвищення інтенсивності навантаження.

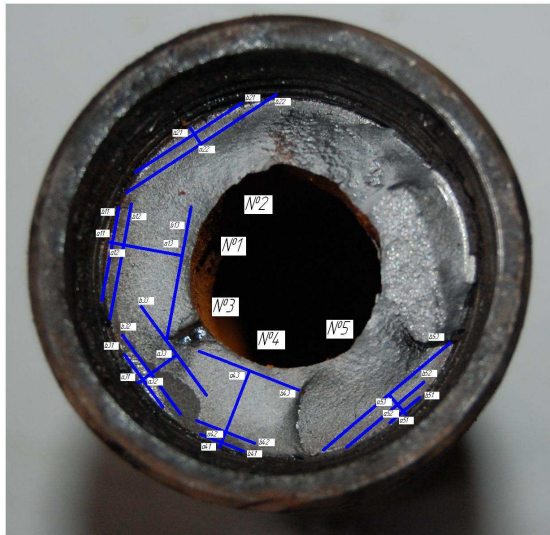
Відкинувши розвиток півеліпсоїдних тріщин, які припинили свій подальший ріст за постійної роботи труб в ускладнених умовах (рис. 7, крива 1), отримаємо своєрідний аналогічний зв'язок втомної довговічності зразка із відповідними їм залежностями  $b = f(a)$ .

Щоб з'ясувати, чи характерна достовірність таких результатів для різних типорозмірів бурильних труб, проведено серію додаткових досліджень у аналогічному напрямі. Об'єктами досліджень слугували втомні злами зразків бурильних труб СБТ-50 групи міцності «Д» (рис. 8), отримані за різних схем навантаження (рис. 9).

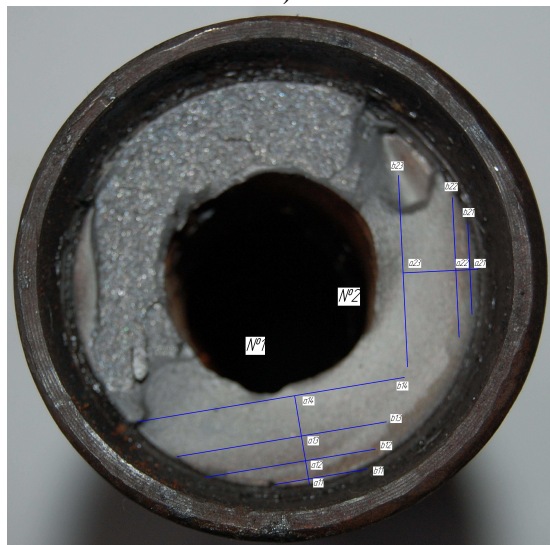
Вимірявши величини півеліпсоїдних втомних тріщин, отримали характерні закономірності росту довжин втомних тріщин в залежності від їх глибин для даного типорозміру труб (рис. 10). З отриманих результатів досліджень прослідковуються близькі до попередніх закономірності в розвитку півеліпсоїдних тріщин. Різниця в характерних особливостях підростання тріщин пояснюється відмінністю схем прикладення навантаження (послідовність ступенів навантаження проходить як з підвищенням, так і з пониженням навантаження).

Розглядаючи варіант схеми за підвищення інтенсивності навантаження (рис. 9, а), спостерігається близька за будовою крива  $b = f(a)$  (рис. 10, а) – значне співвідношення розмірів  $b/a$  на ранніх стадіях втомного руйнування та практично стала довжина тріщини  $b$  після досягнення певної її величини.

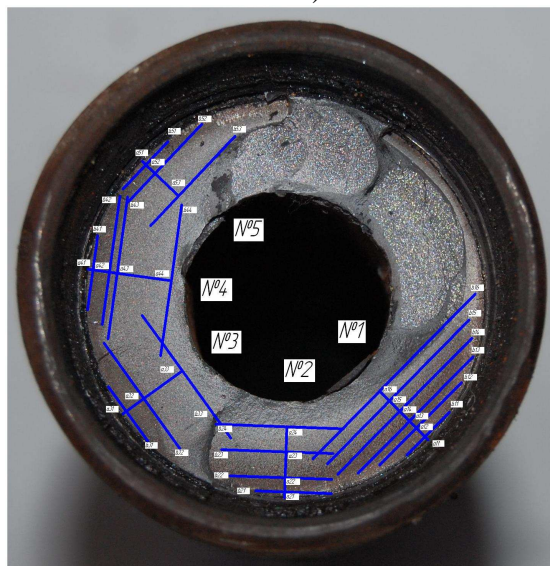
Наступні два варіанти схем навантаження практично «змішані» та поєднують в собі як ступені підвищення, так і пониження інтенсивності навантаження (рис. 9, б, в). В результаті дослідні криві  $b = f(a)$  містять в своїй побудові частини, що відповідають як ступеням підвищення, так і пониження інтенсивності навантаження (рис. 10, б, в).



а)



б)



в)

а – №1; б – №2; в – №3

Рисунок 8 – Загальний вигляд зламів зразків труб, отриманих за різних схем навантаження з розміщенням областей розвитку півеліпсоїдних втомних тріщин

Таким чином, за результатами виконаної роботи сформульовані загальні висновки:

- описано загальну фізичну схему росту півеліпсоїдних втомних тріщин на основі аналізу отриманих поверхонь руйнування зламів труб незалежно від схеми навантаження;

- запропоновано уточнені розрахунки величини розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  для півеліпсоїдних тріщин за різних схем навантаження;

- виявлено своєрідний зв'язок втомних довговічностей зразків з відповідними їм залежностями довжин півеліпсоїдних втомних тріщин  $b$  від відповідних їм глибин  $a$  -  $b = f(a)$  за різних схем навантаження;

- за результатами досліджень розроблено методику оцінки росту півеліпсоїдних втомних тріщин в бурільних трубах за змінних умов навантаження.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення методики прогнозування втомної довговічності бурільних труб за різних варіантів схем навантаження.

### Література

1 Крыжановский Е.И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин: дисс. докт. техн. наук: 05.05.12 / Крыжановский Евстахий Иванович. – Москва, 1990. – 480 с.

2 Иванова В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

3 Івасів В.М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.12 «Машини нафтової і газової промисловості» / Івасів Василь Михайлович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 1999. – 31 с.

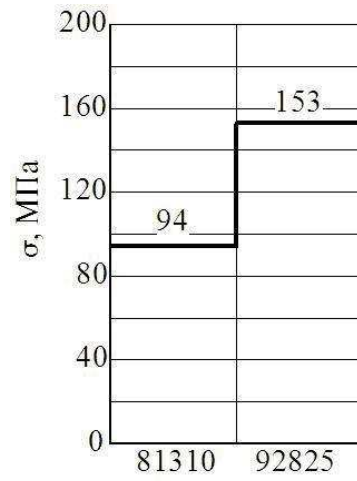
4 Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.

5 Серенсен С.В. Руководство по расчету на усталость деталей машин (в вероятностном аспекте) / С.В. Серенсен, В.П. Когаев. – М.: ИМАШ ВНИИНМАШ. – 1972. – 107 с.

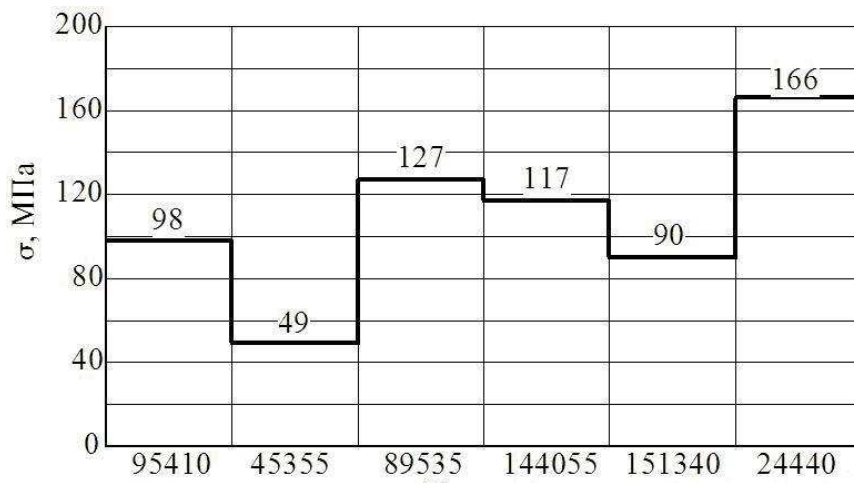
6 Трошенко В.Т. Трещиностойкость материалов при циклической нагрузке / В.Т. Трошенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – К.: Наукова думка, 1978. – 256 с.

7 Артım В.І. Дослідження втомної довговічності натурних зразків бурільних труб за багатоступеневого навантаження / В.І.Артım, І.М. Гойсан // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: держ. міжвід. наук.-техн. зб. / Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2010. – №1. – С. 46-52.

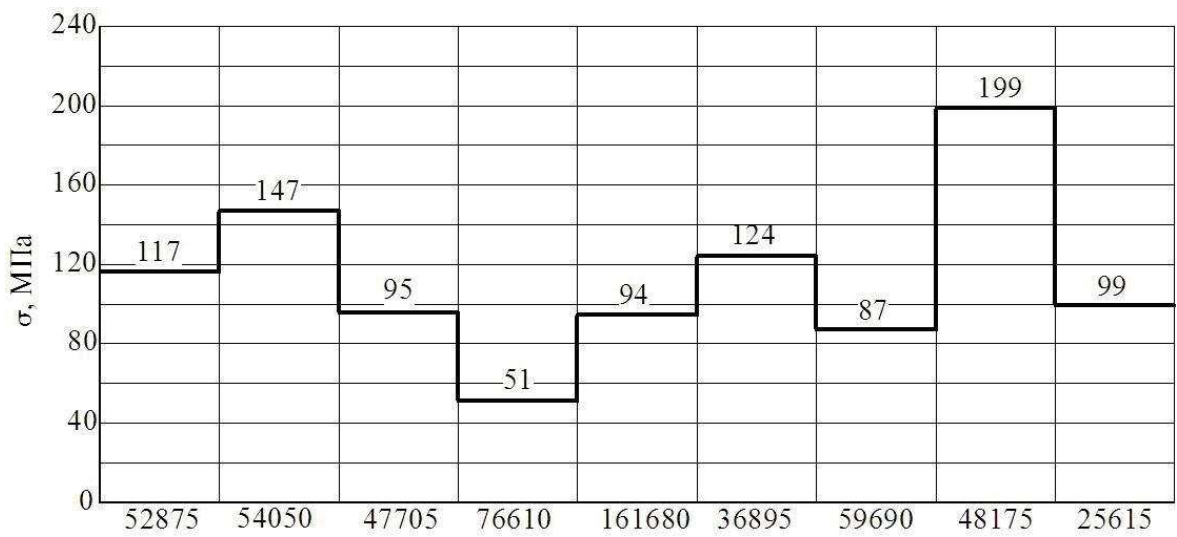




а)



б)



в)

а – №1; б – №2; в – №3

Рисунок 9 – Схеми навантажування зразків бурильних труб СБТ-50

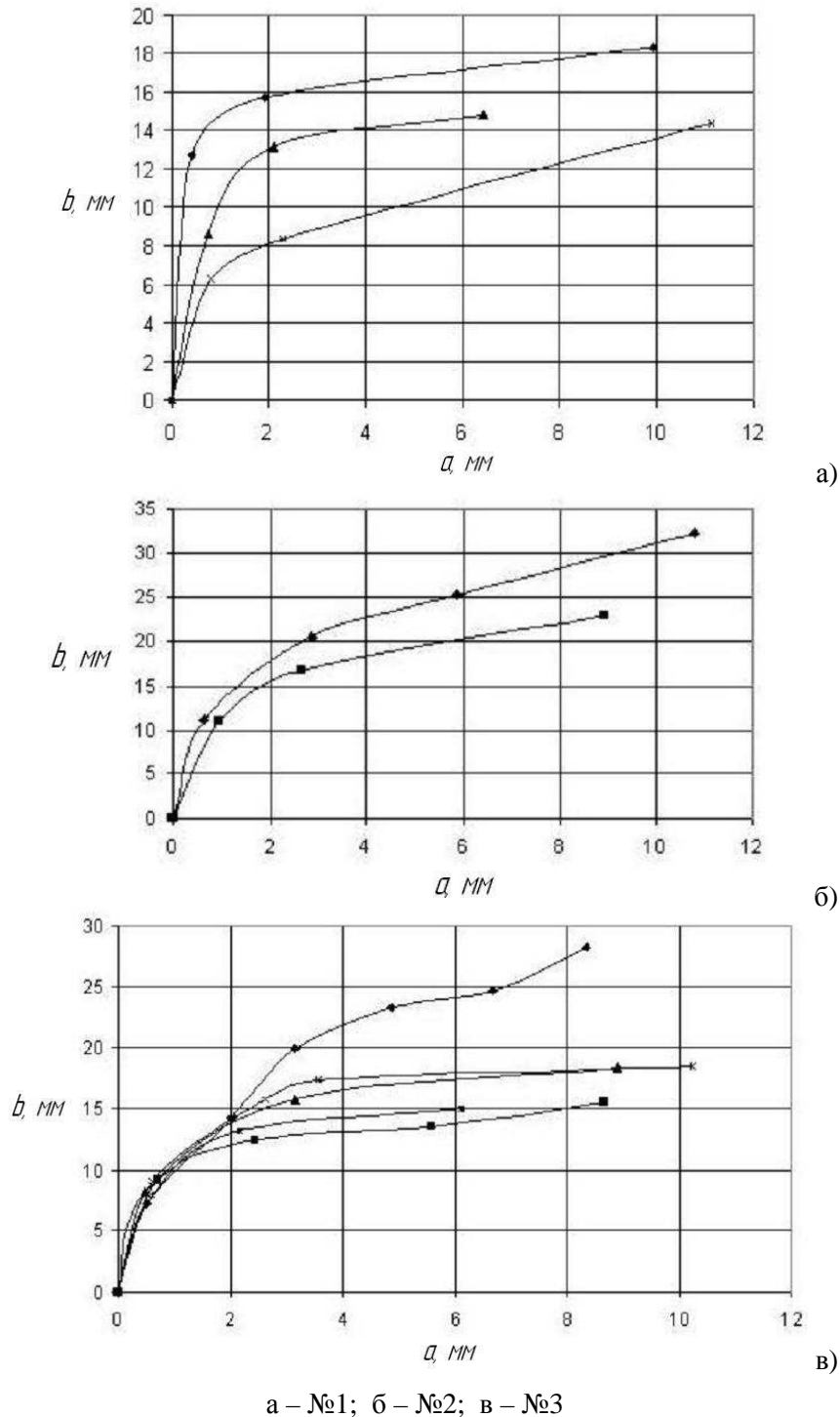


Рисунок 10 – Графічні залежності довжин півеліпсоїдних втомних тріщин від відповідних їм глибин  $b = f(a)$  за відповідних схем навантажування

8 P.C. Paris and F. Erdogan, Transactions ASME // Journal of Basic Engineering, 1963. – 85. P. 528 - 533.

9 Гусев А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

10 G.R. Irwin, Transactions ASME // Journal of Applied Mechanics, 1962. – 29. – P. 651 - 654.

11 Aboutorabi A.A. and Cowling M.J. Determination of stress intensity factors for surface cracks using fatigue crack growth data // International Journal of Fracture, 1986. – 31, №1. – P. 67-69.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
18.02.12  
Рекомендована до друку професором  
Івасівим В.М.