

7. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации: Монография. Ч. 2. — М.: Нефть и газ, 1995. — 493 с.

8. Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. — М.: Недра, 1979. — 297 с.

9. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насы-

щенных пористых сред. — М.: Недра, 1979. — 339 с.

10. Федисин В. Освоения низкопористых коллекторів – резерв збільшення видобутку газу в Україні // Нафта і газ України: Зб. наук. праць: Матер. 6-ої Міжнар. наук.-практ. конф. “Нафта і газ України – 2000”. Т. 3. — Івано-Франківськ: Факел, 2000. — С. 121-124.

УДК 629.12.01.013

КІНЕТИКА ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ НИЗЬКОЧАСТОТНІЙ ВТОМІ

Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний (ІФНТУНГ, Івано-Франківськ)

Представлені результати комплексних досліджень низькочастотної втоми сталі трубопроводу в умовах неоднорідного напруженого стану з використанням деформаційно-кінетичного трактування процесу. Встановлено, що для інженерних розрахунків трубопроводів, виготовлених зі сталі 20, на низькочастотну втому границю витривалості σ_{-1} на базі 10^7 циклів навантаження можна прийняти рівною циклічній границі текучості $\sigma_{0,2}^A$, яка визначається прискореним методом за діаграмами згину зразків-моделей.

При формуванні концепції конструкційної надійності морських трубопроводів важливим є аналіз взаємодії системи «матеріал-конструкція-навантаження і впливи», який базується на експериментальних даних та теоретичних розрахунках [1-3].

Представляють інтерес дослідження кінетики деформування сталі трубопроводу при низькочастотному циклічному навантаженні – постійнодіючому чиннику в період експлуатації лінійної частини морського трубопроводу.

Втомні випробовування на повітрі при температурі 293 К проводили на установці МВ-1К за схемою навантаження чистим згином при частоті обертання зразка 0,8 Гц [4]. Установку також використовували для статичних та повторно-статичних випробовувань.

Зразки-моделі зі сталі 20 діаметром робочої частини $d_p = 5$ мм та розрахунковою довжиною $l_p = 50$ мм виготовляли за розробленою в ІФНТУНГ технологією зі стінок лінійної частини трубопроводу. Кінцева механічна обробка робочої частини зразків – чистове точіння. Частота навантаження (0,8 Гц) та база випробовувань (10^7 циклів) вибрані на основі всебічного аналізу проблеми низькочастотного втомного руйнування морських трубопроводів [1; 5-7].

Results of complex researches of low-frequency fatigue of steel of the pipeline in conditions of an inhomogeneous tension with use deformation-kinetic interpretation of process are reduced. For engineering calculations of pipelines, made from steel 20, on low-frequency fatigue endurance limit σ_{-1} on the base 10^7 cycles of loading is equal cyclic yield limit $\sigma_{0,2}^A$, which is defined the accelerated method on diagrams of flexing of samples-models.

Дослідження проводили у два етапи за розробленою методикою [4; 8].

На першому етапі вивчали поведінку сталі трубопроводу при статичному та повторно-статичному ступінчастому навантаженні. Це дало змогу відстежити на діаграмах згину (рис. 1, а) характерні ділянки: ОА – пружної деформації; АВ – деформаційного зміцнення; ВС – статичної повзучості; О₁А₁ – пружної деформації при повторному згині. При збільшенні навантаження на один ступінь приріст номінального напруження на ділянках ОА, АВ та О₁А₁ постійно становив $\Delta\sigma = 20$ МПа, а час витримки зразка під навантаженням $\Delta t = 20$ с. Такий режим навантаження дає змогу врахувати відставання деформації від напруження в часі і поглиблено вивчати процеси деформаційного зміцнення та повзучості.

Виявлено, що попереднє ступінчасте навантаження з витримкою t_3 при σ_{\max} дає можливість при повторному навантаженні отримати близькі значення $\sigma_{0,2}^A$ та $\sigma_{\text{міл}}^A$, що практично перетворює сталь трубопроводу в пружно-ідеально-пластичний матеріал при залишковій деформації від першого згину $\Delta\varepsilon^A = 0,0012$ (рис 1, а).

Результати, отримані при зазначених режимах статичного навантаження, не є несподіваними, але по-новому окреслюють пробле-

му конструкційної надійності морських трубопроводів та вказують на виняткову актуальність досліджень сталей трубопроводів при низькочастотному циклічному навантаженні в широкому діапазоні амплітуд напружень та деформацій.

Основним завданням досліджень на другому етапі було експериментальне відпрацювання теорії низькочастотної втоми для неоднорідного напруженого стану, використовуючи деформаційно-кінетичне трактування процесу [9].

На рис. 1, б представлено повну криву низькочастотної втоми, починаючи з одного циклу навантаження, якому відповідає руйнівне напруження, близьке до границі міцності $\sigma_{\text{міл}}^{\text{д}}$ при повторному статичному згині (рис. 1, а).

В літературі переважно зустрічаються схематичні зображення повних кривих втоми [10-12], які не відображають поведінки конкретного матеріалу, особливо, коли моделюються складні умови його експлуатації в конструкції трубопроводу.

При циклічному навантаженні може відбуватися квазістатичне, малоциклове та багатоциклове втомне руйнування [12].

Квазістатичне руйнування з утворенням шийки в місці злому спричинює циклічна повзучість при випробовуваннях на розтяг-стиск, коли рівень прикладених напружень істотно перевищує границю текучості матеріалу і реалізується м'який режим малоциклового навантаження.

Малоциклову втому характеризують такі специфічні особливості [10; 13; 14]: рівень

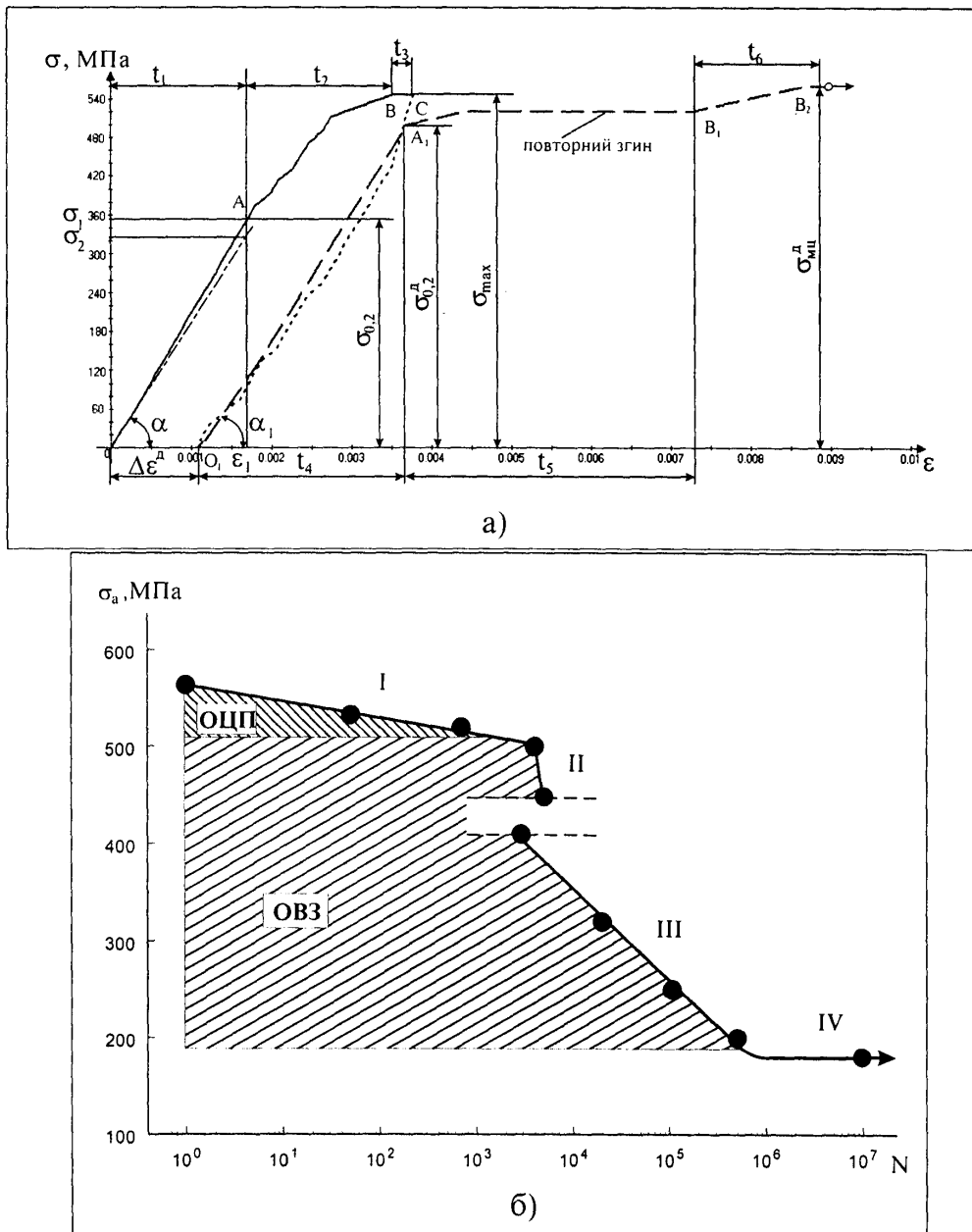


Рисунок 1 – Діаграми згину (а) та повна крива втоми (б), побудовані за результатами випробовувань зразків-моделей

високих напружень (деформацій), що зумовлює довговічність матеріалу до $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$ циклів; низька частота навантаження (0,1...1 Гц); наявність контрольованого параметра (розмаху навантаження або розмаху деформації). Зломи низькочастотної малоциклової втоми конструкційних матеріалів високої та середньої міцності мають типову втомну зону.

Багатоциклове втомне руйнування більшості дослідників відносять до частот навантаження 10...300 Гц [7; 9; 11; 13].

При інтерпретації повної кривої втоми області багатоциклової та малоциклової втоми, а також циклічної повзучості (квазістатичного руйнування) розмежовують за довговічністю та рівнем напружень [10; 11; 13].

Повна крива низькочастотної втоми, побудована нами за результатами випробувань зразків-моделей, складається з чотирьох характерних ділянок (рис. 1, б).

На ділянці I спостерігали інтенсивне накопичення пластичної деформації з перших циклів навантаження, яке можна охарактеризувати як циклічну повзучість [9], в результаті чого зразки лише згиналися, а не руйнувалися з утворенням поверхонь зламів.

Ділянка II відповідає малоцикловому низькочастотному деформуванню та руйнуванню з утворенням втомного зламу.

Ділянки I та II на кривій втоми відповідають рівням напружень, які знаходяться в пружно-пластичній області, що окреслена ділянкою АВ (деформаційного зміцнення) на діаграмі згину (рис. 1). Розмежування ділянок I та II експериментально здійснити важко. Найбільша амплітуда напружень, при якій ще мало місце руйнування з утворенням втомного зламу становила 498,9 МПа (рис. 2). При переході від ділянки I до ділянки II на кривій втоми спостерігали значний перегин, що можна пов'язати зі зміною механізму деформування та руйнування [11; 15].

Дослідження зміни амплітуди пластичної деформації зразків при циклічному навантаженні на ділянці II (рис. 2, криві 1,2) засвідчили яскраво виражену стадійність процесів, які протікають в такій послідовності:

1) інтенсивне пластичне деформування протягом перших 25...150 циклів (рис. 3, криві 1,2), що відбувається в діапазоні амплітуд напружень 450...499 МПа без істотного нагрівання зразків від внутрішнього тертя (специфічна особливість низькочастотної втоми низьковуглецевої сталі);

2) сповільнення процесу пластичного деформування з асимптотичним наближенням до граничного значення, яке залежить від амплітуди напружень, що є прямим підтвердженням деформаційного зміцнення полікристалічної структури зразків (рис. 2, криві 1, 2);

3) стабілізація амплітуди пластичної деформації (стадія насичення, коли форма та ширина петлі гістерезису вже не змінюються [10]);

4) прискорене зростання магістральної втомної тріщини, тобто такої, яка при заданих умовах навантаження розвивається з більшою швидкістю, ніж інші тріщини [12] і є причиною остаточного руйнування зразка.

Тривалість кожної стадії залежить від амплітуди напружень і закономірно змінюється (табл. 1). Із збільшенням амплітуди напружень в 1,1 рази відносна тривалість першої, другої та четвертої стадій втоми відповідно зменшується в 5,5, 1,4, та 1,18 рази, а третьої – збільшується в 1,14 рази. При цьому число циклів до руйнування зменшується в 1,1 рази.

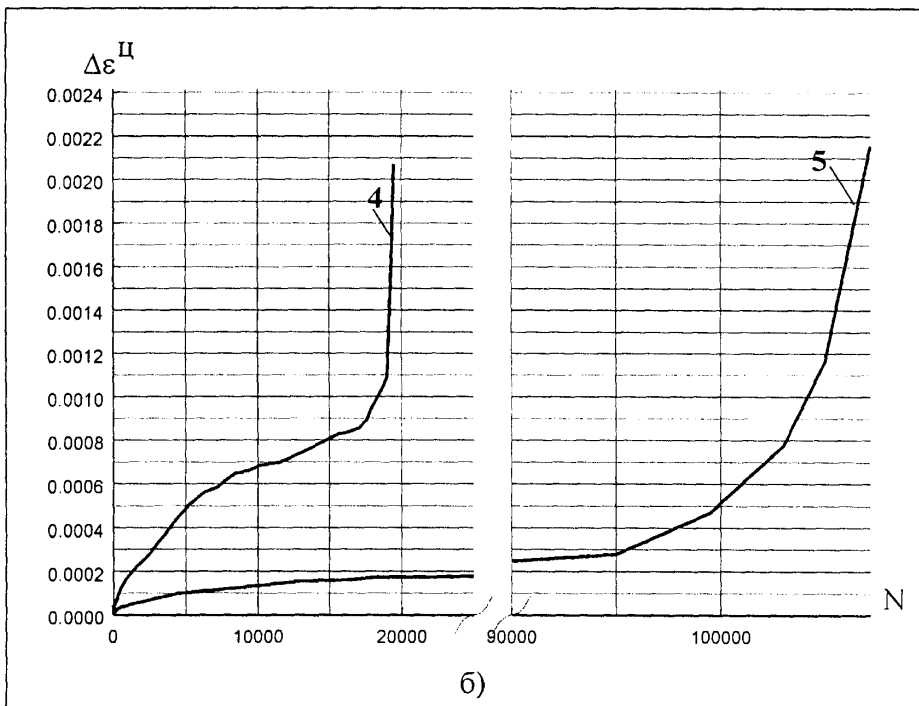
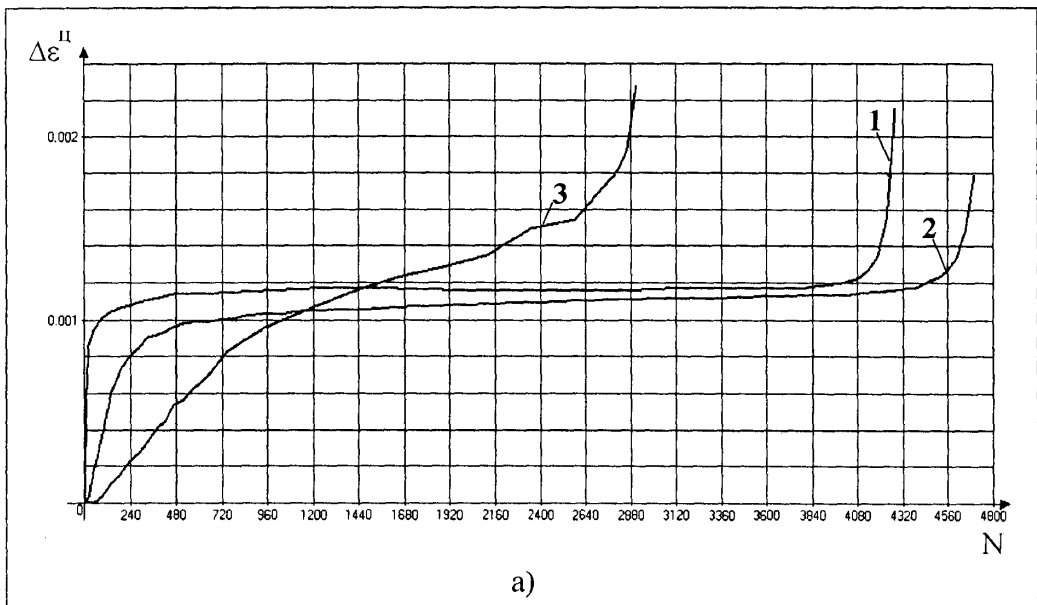
Таблиця 1 – Тривалість стадій низькочастотної втоми для граничних амплітуд напружень ділянки II

Амплітуда напружень, МПа	Тривалість стадій втоми, %				Число циклів до руйнування
	1	2	3	4	
498,9	0,58	10,52	76,34	12,56	4277
450	3,19	14,89	67,03	14,89	4700

При переході від ділянки II до ділянки III на кривій втоми в інтервалі довговічностей $10^3 \dots 10^4$ циклів має місце розрив (рис 1, б) з експериментально визначеними граничними значеннями амплітуд напружень 412,6 та 450 МПа. Кінетика пластичного деформування зразків при зазначених амплітудах напружень істотно відрізняється (рис. 2, криві 2, 3).

На початку першої стадії втоми при амплітуді напружень 412,6 МПа величина пластичної деформації $\Delta \epsilon^p$ (рис. 4) залишається близькою до нуля протягом 50...60 циклів (рис. 3, крива 3), а потім починає зростати з постійною інтенсивністю до ~ 750 циклів. Подальший стабільний приріст пластичної деформації аж до утворення магістральної втомної тріщини відбувається з меншою інтенсивністю.

Таким чином, стабілізація амплітуди пластичної деформації при $\sigma_a = 412,6$ МПа не спостерігається. Характерним також є те, що величина $\Delta \epsilon^p$ на початку стадії прискореного росту магістральної втомної тріщини при $\sigma_a = 412,6$ МПа відчутно більша від відповідної величини пластичної деформації при $\sigma_a = 450$ МПа. В результаті втомна довговічність при $\sigma_a = 450$ МПа досягає 4700 циклів, а при $\sigma_a = 412,6$ МПа – лише 2914 циклів, що підтверджує точку зору, згідно з якою пластична деформація контролює руйнування і зумовлює часову залежність міцності твердих тіл [9, 15, 16].



амплітуди напружень (МПа): 1 – 498,9; 2 – 450; 3 – 412,6; 4 – 316,7; 5 – 250

Рисунок 2 – Зміна амплітуди пластичної деформації при низькочастотній втомі сталі трубопроводу

Ділянка III відповідає низькочастотній багатоциклової втоми і практично знаходиться в пружній області, що окреслена ділянкою ОА на діаграмі згину (рис. 1).

Поділ на малоциклову та багатоциклову втому за частотою навантаження, рівнем напружень та довговічністю є умовним, якщо не підкріплюється характерними дослідженнями. В нашому випадку частота навантаження взагалі не може виступати критерієм поділу, а діапазон довговічностей для низькочастотної багатоциклової втоми становить $3 \cdot 10^3 \dots 10^6$ циклів, що встановлено на основі аналізу:

1) кінетики пластичного деформування сталі трубопроводу на першій (рис. 3, криві 3, 4, 5) та наступних (рис. 2, криві 3, 4, 5) стадіях втоми;

2) діаграм згину при статичному та циклічному низькочастотному навантаженні (рис. 4);

3) макробудови зломів низькочастотної втоми.

Аналіз кривих 3, 4, 5 (рис. 2) розкриває спільну характерну ознаку процесу деформування зразків у верхній та середній областях ділянки III – відсутність стабілізації амплітуди пластичної деформації. При амплітудах

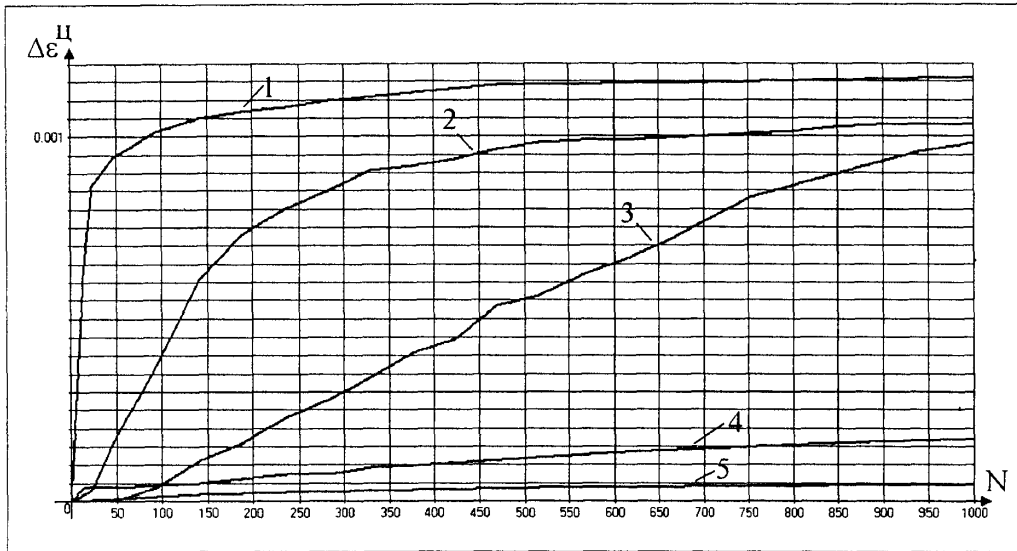


Рисунок 3 – Кінетика пластичного деформування сталі трубопроводу на першій та другій стадіях низькочастотної втоми

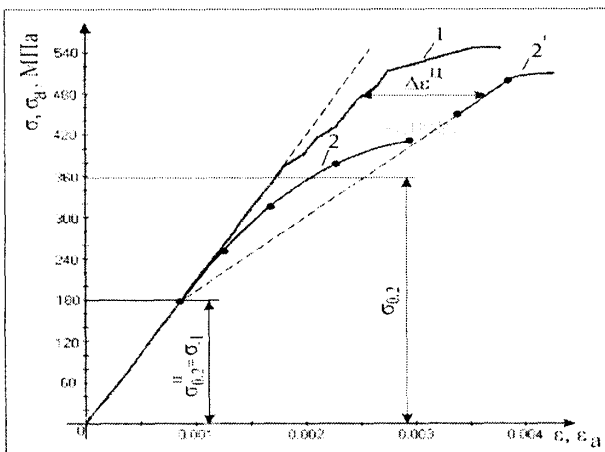


Рисунок 4 – Діаграми згину при статичному (1) та циклічному низькочастотному навантаженні (2, 2')

напружень, близьких до σ_{-1} , загальний приріст пластичної деформації до початку стадії прискореного росту магістральної втомної тріщини залишається незначним. Для зразків, які пройшли 90000 циклів навантаження при $\sigma_a = 250$ МПа, величина $\Delta \varepsilon^{II} \approx 0,0002$.

Діаграми згину при статичному та циклічному низькочастотному навантаженні ($N = 1000$ циклів) додатково ілюструють наявність розриву на кривій втоми та вказують на різний механізм накопичення пластичних деформацій на ділянках II та III (рис. 4). Встановлено, що для інженерних розрахунків трубопроводів на низькочастотну втому, виготовлених зі сталі 20, які експлуатуються при подібній схемі навантаження [4; 8], границю витривалості σ_{-1} на базі 10^7 циклів можна приймати рівною циклічній границі текучості $\sigma_{0,2}^{II}$, визначеній з діаграм згину. При цьому відпадає необхідність проводити довготривалі випробовування зразків для визначення на кривій втоми ділянки IV та відповідно

фізичної границі витривалості. Нагадаємо, що при частоті навантаження 0,8 Гц проходження зразком бази 10^7 циклів відбувається за 148 діб. Крім того, простежується залежність границі витривалості σ_{-1} від границі текучості при статиці $\sigma_{0,2}$, а саме $\sigma_{-1} \approx 0,5\sigma_{0,2}$.

Важливу інформацію про роботу сталі трубопроводу в експлуатаційних умовах дають спільні дослідження кінетики низькочастотного втомного деформування та руйнування і закономірностей будови зламів.

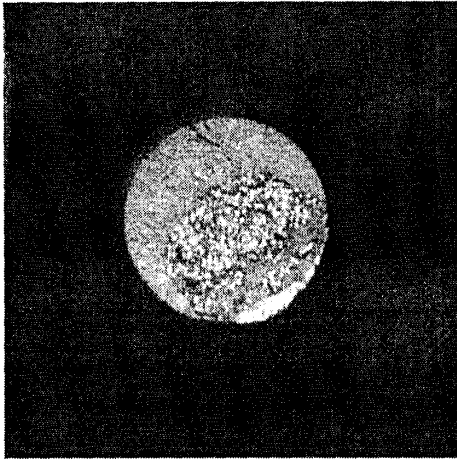
Встановлено, що макробудова зламів низькочастотної малоциклової та багатоциклової втоми істотно відрізняється (рис. 5).

При низькочастотній малоциклової втомі на поверхні зламів мають місце незначні уступи у втомній зоні (рис. 5, а). Сильно згладженої зони, характерної для типових втомних зламів, не спостерігається. Добре простежується перехід від втомної зони до зони доламу, що утворюється внаслідок дії напружень, більших $\sigma_{\text{мі}}^a$.

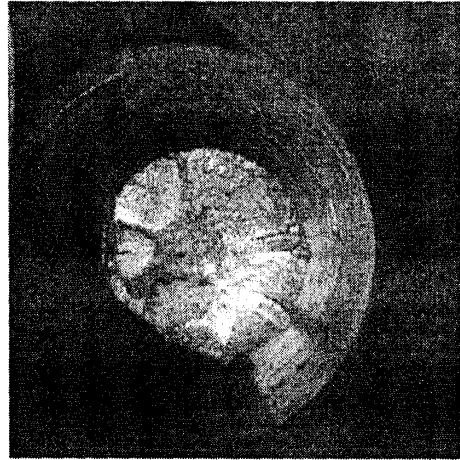
Для низькочастотної багатоциклової втоми характерні багатолопатеві злами (рис. 5, б) з яскраво вираженими уступами, що свідчить про одночасне (або майже одночасне) вибіркоче зародження тріщин та їх розвиток з різних місць, розташованих в паралельних площинах.

Відношення площі втомної зони до площі зони доламу вважається мірою величини циклічних напружень, які спричинюють руйнування і є додатковою важливою інформацією про поведінку сталі. Розрахунки показують, що при $\sigma_a = 498,9$ МПа величина такого відношення становить 1,08, а при $\sigma_a = 250$ МПа – 3,57.

Область втомного зламу (ОВЗ) окреслена ділянками II та III повної кривої втоми, а ділянка I відноситься до області циклічної



а)



б)

амплітуди напружень: а – 498,9, б – 250 МПа; число циклів до руйнування: а – 4277, б – 107000

Рисунок 5 – Макробудова зломів низькочастотної втоми, $\times 10$

повзучості (ОЦП) (рис. 1, а).

Таким чином, в результаті комплексних досліджень за розробленою нами методикою розкрито важливі закономірності низькочастотного малоциклового і багатоциклового втомного деформування та руйнування сталі трубопроводу при неоднорідному напруженому стані.

1. Харионовский В. В. Конструктивная надежность магистральных трубопроводов в эксплуатации / Строительство трубопроводов. – 1992. – №3. – С. 14-16

2. An investigation on fatigue in high-strength steel offshore structures / Agerskov H., Petersen R. I., Martinez L. Lopez // Weld. World. – 1998. – 41. – №4. – pp. 328-342

3. Damage tolerance assessment of welded joints subjected to fatigue crack growth / Lassen T. // Proc. 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Montreal, May 24-29, 1998. – Golden (Colo), 1998. – pp. 27-32.

4. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Перспективи використання автоматизованих випробувальних систем з ЕОМ для оцінки корозійно-механічних властивостей матеріалів морських трубопроводів / Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КГПУ. Вып. 1/2001 (10). – Кременчуг: КГПУ, 2001. – С. 21-23

5. Капустин К. Я., Камышев М. А. Строительство морских трубопроводов. – М.: Недра, 1982. – 207 с.

6. Испытание материалов: Справочник / Под. ред. Блюменауэра / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.

7. Gran S. Fatigue in offshore cranes. Norwegian Maritime Research. – 1983. – №4. – pp. 2-12

8. Побережний Л. Я. Комп'ютеризована установка для корозійно-механічних випробовувань матеріалу морських трубопроводів / Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих: Зб. наук. праць I Всеукр. наук.-техн. конф. аспірантів та студентів в м. Донецьку 15-16 травня 2001 р. – Донецьк: ДонДТУ, 2001. – С. 172-174

9. Квасистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. Избр. тр.: В 3-х т. / Серенсен С. В. – К.: Наук. думка, 1985. – Т. 3. – 232 с.

10. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.

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

12. Трощенко В. Т. Покровский В. В., Прокопенко А. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1987. – 256 с.

13. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.

14. Карпенко Г. В., Кацов К. Б., Кокотайло И. В., Руденко В. П. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах. – К.: Наук. думка, 1977. – 112 с.

15. Ясній П. В. Пластично деформовані метали: втoma і тріщинотривкість. – Л.: Світ, 1998. – 292 с.

16. Данилов В. И., Нариманова Г. Н., Зуев Л. Б. Пластическое течение в зоне концентратора (трещины) в малоуглеродистой стали / Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22. – № 6. – С. 56-60