

ДЕФОРМАЦІЙНА ПОВЕДІНКА МОРСЬКИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Є. І. Крижанівський, Л. Я. Побережний

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

Надійшла до редакції 12.08.05

Резюме: Виявлені загальні закономірності деформування труб з низьковуглецевої сталі в морських трубопроводах при статичному і повторному статичному поступовому навантаженнях чистим згином, які дають змогу прогнозувати деформаційну поведінку тіла труби та зварного з'єднання в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: трубопровід, навантаження, деформація, чистий згин, повзучість, умовна границя плинності, зварний шов.

Е. И. Крыжановский, Л. Я. Побережный. ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МОРСКИХ НЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Резюме: Виявлены общие закономерности деформирования труб из низкоуглеродистой стали в морских трубопроводах при статической и повторной статической постепенной нагрузках чистым изгибом, которые позволяют прогнозировать деформационное поведение тела трубы и сварного соединения в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: трубопровод, нагрузка, деформация, чистый изгиб, ползучесть, условная граница текучести, сварной шов.

Ye. I. Kryzhanivsky, L. Ya. Poberezhnyy. DEFORMATION BEHAVIOUR OF THE OFFSHORE OIL AND GAS PIPELINES UNDER THE EXPLOITATION CONDITIONS.

Abstract: The general deformation regularities of offshore low carbon steel pipeline under the static and reiterated static loading by pure bending is defined. These deformation regularities give the possibility to forecast the strain behavior of pipe body and welded junction in real exploitation conditions.

Keywords: pipeline, loading, deformation, pure bending, landslide, conditional liquid limit, welded junction.

Аварії та аварійні ситуації на морських трубопроводах викликані тим, що в процесі експлуатації стан труб та обладнання на трубопроводах з часом погіршується.

В трубопроводах відбуваються руйнівні процеси корозії та ерозії, в стінках труб під впливом постійних та змінних напружень утворюються тріщини. Підводні трубопроводи

піддаються дії морських течій у період будівництва та в період експлуатації – коли їх укладають безпосередньо на дно моря, не заглиблюючи в ґрунт, або якщо вони оголяються внаслідок деформації морського дна [1].

Аналіз причин аварій морських трубопроводів свідчить, що приблизно 75 % всіх пошкоджень відбувається в результаті дії на

трубопровід хвиль і течій [2]. Ця дія є однією не тільки з найбільш поширених та небезпечних, але й найменш прогнозованих причин аварій. Так, трубопровід, укладений в траншею та засипаний піском, під час шторму може вийти на поверхню ґрунту та піддаватися активному впливу хвиль і течій, в результаті чого може утворитися ділянка, що провисає та здійснює коливання. Це, в свою чергу, спричиняє деформацію (згин) трубопроводу, призводить до розтріскування залізобетонної оболонки, розриву ізоляційного покриття та проникнення морської води до металу трубопроводу та утворення вторинних концентраторів напружень, що в комплексі викликає передчасне руйнування.

В інженерній практиці для розрахунку дії хвиль на споруди розглядається окрема хвиля, збурена екстремальними штормовими умовами, або середньостатистична характеристика хвильового процесу за цих самих умов. У першому і другому випадках необхідно встановити зв'язок між характеристиками хвиль і швидкостями, прискореннями і тиском у воді. Для цього використовується відповідна теорія хвиль. У сучасних методах розрахунку використовують найчастіше теорію хвиль Д. Б. Ері і теорію хвиль Д. Г. Стокса [3].

Теорія хвиль Ері застосовується звичайно в попередніх розрахунках. Для більш точних розрахунків необхідно використовувати теорію хвиль Стокса. Теорія хвиль Ері побудована на припущенні про синусоїдальний профіль хвилі і малій висоті хвилі H порівняно з її довжиною $l_{\text{хв}}$ і глибиною води h .

Відзначимо, що перелічені навантаження та зовнішні впливи не вичерпують всієї сукупності взаємодій морського середовища з трубопроводом. В процесі експлуатації проявляється така велика кількість статичних та динамічних силових факторів, зумовлених специфікою морського середовища та умовами роботи трубопроводу, що прогнозування

їх величини та діапазону зміни сучасними методами недостатньо достовірне. Також важко передбачити фактичне спрацювання труб та зміну перерізу трубопроводу на всій його протяжності під час експлуатації. Крім того, необхідно врахувати ймовірність випадкових навантажень.

Дослідження силового впливу морських хвиль на підводний трубопровід показали, що окремі недостатньо збалансовані його ділянки можуть змінювати своє початкове положення та зміщуватися в напрямку руху хвиль. Причому періоду руху хвилі відповідає повний цикл навантаження трубопроводу. Частота хвиль залежить від їх довжини та глибини акваторії.

Можна зробити висновок, що при експлуатації сталь трубопроводу піддається повторно-статичному та динамічному навантаженню впродовж певного часу, коли створюються умови розвитку **низькочастотної втоми**, яка залежно від амплітуди напружень чи деформацій може бути **малоцикловою** та **багатоцикловою**. За час експлуатації в 30 років метал трубопроводу може зазнати $10^8 - 10^9$ циклів навантажування.

Малоциклова втома характеризується низькою частотою прикладання навантаження (0,1...5 Гц), деформування матеріалу за границею текучості та невеликою кількістю циклів до руйнування (до $5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$) [4].

Багатоциклова має частоту навантаження 10–300 Гц [5].

Розвиток тріщини при малоциклової втоми супроводжується значними пластичними деформаціями внаслідок високої амплітуди напружень; при багатоциклової втоми руйнування відбувається без видимих слідів залишкової деформації. Зазначимо, що спроби принципово розмежувати багатоцикловою класичну втому та втому при малій кількості циклів за вищезгаданими характеристиками при дослідженні матеріалу морських трубопроводів були безрезультатними.

Для комплексного дослідження в кінетиці деформації, руйнування та електродного потенціалу матеріалу трубопроводу розроблена автоматизована випробувальна система з ЕОМ [6, 7], що включає установку МВ-1К [8] для випробовувань зразків моделей, лабораторний комп'ютер, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) на базі мікросхеми AD 7714 фірми Analog Devices та пристрій для сканування поверхні руйнування та подальшого опрацювання отриманих цифрових відбитків у графічному редакторі з використанням комп'ютерної бази даних.

У процесі багаторічної експлуатації матеріал трубопроводу істотно змінює свої фізико-механічні властивості, що призводить до формування в конструкції трубопроводу складно прогнозованого і важко контролюваного напружено-деформованого стану, дослідження якого мають науковий та практичний інтерес.

На базі автоматизованої випробовуваної системи розроблено розширену інженерну методичку дослідження корозійно-механічного руйнування матеріалу трубопроводу. Методика передбачає таку послідовність підготовчих та дослідницьких етапів роботи.

На *першому етапі* здійснюється докладний аналіз взаємодії системи "матеріал – конструкція – навантаження і впливи" з використанням отриманих раніше експериментальних даних та теоретичних розрахунків [6–14], а також новітньої інформації через мережу Інтернет. Створюється початкова база даних.

На *другому етапі* з матеріалу визначених ділянок трубопроводу або окремо взятих труб, що підлягають дослідженню, вирізають заготовки, з яких виготовляють зразки-моделі, що дає змогу в подальшому ефективно використовувати теорію структурної подібності. Для цієї мети можна використовувати зразки-свідки або індикатори накопичення відповідних дефектів, які встановлюються

при спорудженні трубопроводу. В такому випадку дослідження трубопроводу здійснюється без зупинки його роботи і руйнування [15].

Третій етап вимагає правильного вибору схеми навантаження та режимів випробовування у лабораторних умовах з метою досягнення на зразках-моделях з попередньо визначеною конфігурацією імітації роботи досліджуваного матеріалу в конструкції. Береться до уваги і характер експлуатаційного руйнування трубопроводу.

У випадку ускладнених випробовувань з корозійно-механічним руйнуванням зразків-моделей, коли, наприклад, статичне та циклічне навантаження закономірно чергуються і має місце повне чи часткове розвантаження зразка або його довантаження, пропонується, з метою систематизації досліджень, до початку експерименту будувати графіки зміни навантаження в часі. Зазначимо, що на установці реалізується схема м'якого навантаження, яке є заданою величиною і не може зменшуватися зі зменшенням опору зразка.

Четвертий етап передбачає планування та реалізацію експерименту, основна мета якого – розкриття взаємозв'язку в процесі деформації та руйнування трубопроводів, базуючись на основних положеннях механіки корозійного руйнування з його фізико-хімічними аспектами та методологічних основ трибофатики.

Пропонується такий порядок комплексних досліджень несучої здатності сталі трубопроводу у морській воді [10]:

1. Вивчення на зразках-моделях поведінки сталі з різною структурою при статичному та повторно-статичному ступінчастому навантаженні з докладним аналізом закономірностей деформаційного зміцнення з використанням діаграм згину, побудованих в координатах номінального напруження σ – відносна деформація крайнього волокна ϵ , та зведених діаграм згину, виражених у відносних координа-

тах $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}^*}$ та $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T}$, де $\sigma_{0,2}^*$ – умовна границя текучості; ε_T – відносна деформація крайнього волокна при $\sigma_{0,2}^*$; дослідження кінетики параметрів механічного гістерезису та фізико-хімії корозії під напруженням (реєстрація зміни електродного потенціалу в процесі статичного навантаження (розвантаження) зразка, побудова поляризаційних кривих, оцінка впливу рН середовища тощо); визначення стандартних та нестандартних фізико-механічних характеристик некородованої та кородованої сталі [14].

- Паралельне дослідження кінетики деформації та електродного потенціалу сталі при низькочастотній корозійній втомі в широкому діапазоні амплітуд напружень при різних схемах навантаження і режимах випробовувань з використанням спеціалізованого програмного забезпечення; побудова графіків у координатах амплітуд деформації ε_a (амплітуда пластичної деформації $\Delta\varepsilon^n$) – кількість циклів наван-

таження N (час t) та електродний потенціал $E-N, t$, а також повних кривих втоми у координатах $\sigma_a, \varepsilon_a^{N_T} - N, 1/T, \lg N$, діаграм циклічного згину [12, 13] та граничних напружень для прогнозування втомного і корозійно-втомного руйнування в асиметричних циклах.

- Дослідження поверхонь руйнування методом сканування [16] з метою використання отриманої інформації при проведенні аналізу причин та характеру експлуатаційних руйнувань морських трубопроводів (оперативної діагностики зламів).
- Вивчення структури недеформованої та деформованої сталі, розрізання попередньо підготовлених зламів та зруйнованих зразків з метою дослідження профілю поверхні руйнування, мікроструктури в зоні зламу, а також профілю, траєкторії, характеру поширення та еволюції тріщин.

Умови, за яких конструкції при досягненні елементом граничних деформацій або про-

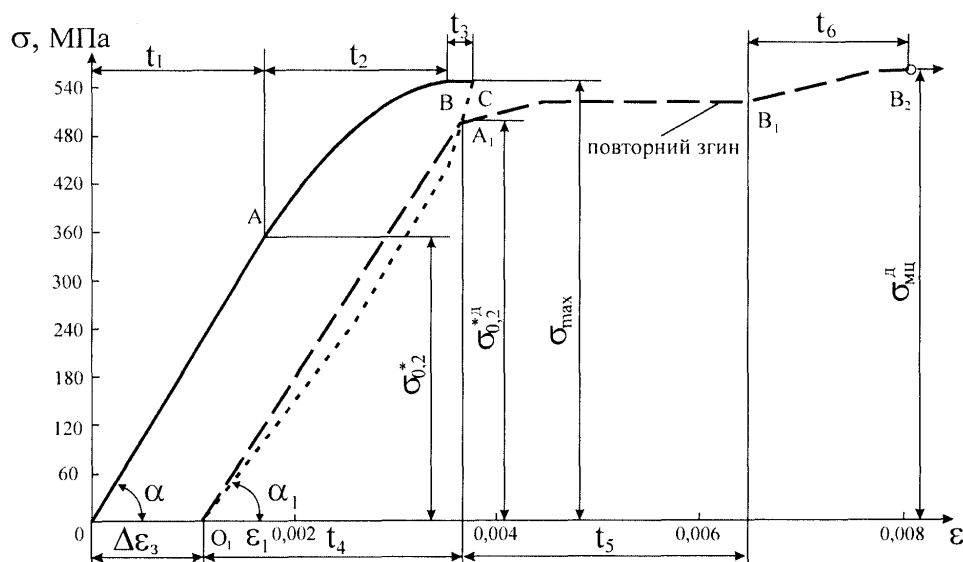


Рис. 1. Діаграми згину зразків-моделей

гинів не руйнуються, є такі: $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{гр}$, $\delta_i \leq \delta_{гр}$, де ε_i та δ_i відповідно відносна деформація та переміщення елемента в напрямку, який розглядається; $\varepsilon_{гр}$ та $\delta_{гр}$ – граничні значення цих параметрів, які визначаються працездатністю елемента.

Коректність розрахунку ε_i та δ_i зумовлюється розрахунковими схемами, а правильність встановлення $\varepsilon_{гр}$ та $\delta_{гр}$ залежить від надійності отриманих при механічних випробуваннях результатів.

В експлуатаційних умовах стінка трубопроводу працює у складному напруженому стані. У зв'язку з цим доцільно проводити випробування на статичний чотириточковий згин циліндричних зразків-моделей, коли, внаслідок сталості згинального моменту між точками прикладання навантаження, створюються умови, за яких одержані результати випробувань не залежать від можливих неоднорідностей зразка.

Діаграми згину (рис. 1) побудовані за результатами випробувань на повітрі при температурі 293 К шліфованих зразків-моделей ($l_p/d = 10$), виготовлених зі сталі 20 з термообробкою, яка забезпечувала хаотичну кристалографічну орієнтацію зерен та їх подрібнення.

Використовували безпосереднє ступінчасте навантаження (розвантаження) зразка-моделі, яке відповідає абсолютній податливості випробувальної установки, коли зі зменшенням опору зразка навантаження, що передається на нього, не зменшується. При збільшенні чи зменшенні навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma = 20$ МПа за час $t_{н(р)} = 1$ с. Час витримки на кожному ступені $t_{в} = 19$ с, а сумарний час $\Delta t = t_{н(р)} + t_{в} = 20$ с.

Діаграми згину побудовані за точками, що відповідають значенням ε після витримки при заданих σ .

При першому згині зразків-моделей відстежували такі характерні ділянки: ОА – пруж-

ної деформації, АВ – деформаційного зміцнення, ВС – повзучості. Відповідно, для досягнення ступінчастим навантаженням напруження $\sigma_{0,2}^*$ витрачався час $t_1 = 18 \cdot \Delta t = 360$ с, а час проходження деформаційного зміцнення $t_2 = 9 \cdot \Delta t = 180$ с. Час t_3 , протягом якого досліджували повзучість зразка, становив 360 с.

Нелінійна ділянка CO_1 відповідає розвантаженню зразка, а ділянка O_1A_1 , яку можна вважати лінійною, – повторному навантаженню (згину) за час $t_4 = 500$ с.

Ділянка A_1B_1 , на якій вивчали повзучість при повторному згині, відповідає приросту деформації за час $t_5 = 560$ с при $\Delta\sigma = 20$ МПа.

На ділянці B_1B_2 з приростом деформації за час $t_6 = 90$ с при $\Delta\sigma = 40$ МПа проходить швидкий згин зразка без його руйнування (починаючи з точки B_2 без довантаження), що характерно для випробувань в'язких матеріалів. Напруження $\sigma_{МЦ}^D$, яке відповідає цій точці, приймається за границю міцності при повторному згині.

Діаграми згину показали, що сталь 20 має чітко вираженої границі текучості. Тому в таких випадках при випробуваннях на розтяг визначають умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$, яка відповідає залишковій деформації 0,2 % [7]. Однак після навантаження довгих зразків-моделей чистим згином до області відчутної повзучості (рис. 1, діл. ВС) та наступного розвантаження (діл. CO_1), залишкова деформація $\Delta\varepsilon_3 = 0,0012$, тобто 0,12 %, що вказує на неприйнятність традиційного способу визначення такої важливої характеристики механічних властивостей матеріалу трубопроводу.

Пропонується спосіб визначення умовної границі текучості при ступінчастому навантаженні чистим згином, який полягає в тому, що спочатку за експериментальними точками будують діаграму згину. Потім визначають кут нахилу ділянки пружної дефор-

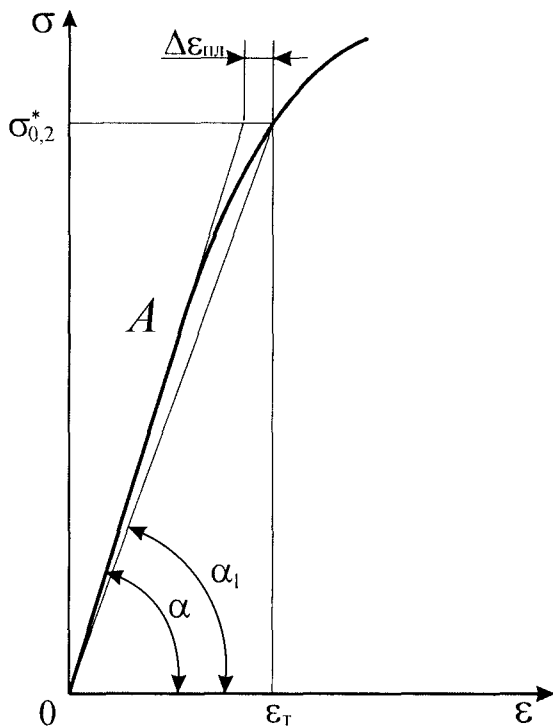


Рис. 2. Визначення умовної границі текучості $\sigma_{0,2}^*$



Рис. 3. Макробудова зварного з'єднання (поздовжній шліф)

мації ОА (рис. 2) $\alpha = \arctg E$, де E – модуль Юнга матеріалу. Потім з точки О проводять пряму під кутом $\alpha_1 = \arctg E_1$. Величину E_1 задаємо, а саме $\frac{E - E_1}{E} \cdot 100\% = 0,2\%$ або $E_1 = 0,998E$.

Тоді пластична деформація

$$\Delta \epsilon_{пл} = \epsilon_T \cdot 0,002 \quad (1)$$

де ϵ_T – відносна деформація, що відповідає умовній границі текучості при чистому згині $\sigma_{0,2}^*$.

Параметри $\Delta \epsilon_{пл}$, $\sigma_{0,2}^*$ та E взаємопов'язані:

$$\Delta \epsilon_{пл} = \frac{0,002 \cdot \sigma_{0,2}^*}{0,998E} \quad (2)$$

Практичне значення величини $\sigma_{0,2}^*$ дво-яке. По-перше, $\sigma_{0,2}^*$ визначає область пружної деформації. За інших рівних умов чим вище напруження $\sigma_{0,2}^*$, тим більший опір матеріалу початковій пластичній деформації, і з цієї точки зору природно, що конструктори прагнуть до отримання матеріалів з максимальним значенням цього параметру. По-друге, положення $\sigma_{0,2}^*$ відносно $\sigma_{мі}^d$ істотно впливає на властивості металу в області пружно-пластичного деформування, де можлива втрата елементом трубопроводу несучої здатності при досягненні граничних деформацій [18]. Але, так чи інакше, вибір допуску 0,2% від ϵ_T набагато краще пов'язаний з реальними умовами навантаження морських трубопроводів, особливо, якщо врахувати, що статичні навантаження чергуються з низькочастотними.

Для сталі 20, що піддається термообробці, $\sigma_{0,2}^* = 360$ МПа, а відношення $\sigma_{0,2}^*/\sigma_{мі}^d = 0,64$. Для порівняння: при осьовому розтягу сталі 20 (ГОСТ 1050–88) $\sigma_T/\sigma_{мі} = 0,60$. Пропонується, щоб ця характеристика для низьковуглецевої сталі трубопроводу не перевищувала 0,75 [19].

При розробці конструктивно-технологічних заходів для зварювання підводних трубопроводів не обійтися без експериментальних досліджень деформації зварного з'єднання при різних схемах та режимах навантаження.

Статичні випробування чистим згином на повітрі при температурі 293 К проводили на зразках-моделях з $l_p/d = 4$, в яких зварний шов розташований посередині робочої частини зразка.

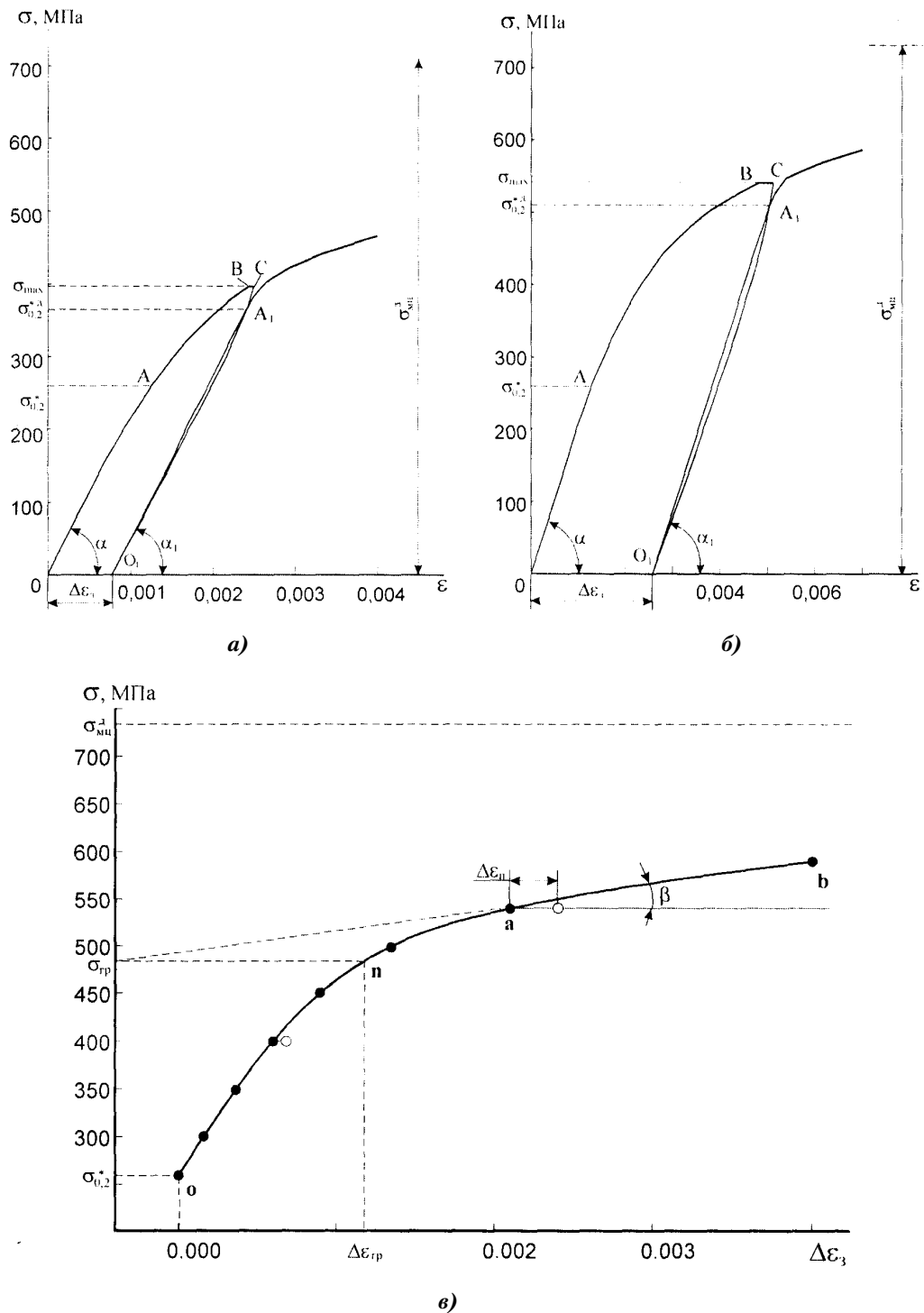


Рис. 4. Оцінка пластичності (а-б) та визначення граничної залишкової деформації (в) зварного з'єднання:
 ● – витримка 20 с; ○ – витримка 360 с

Мікро- та макроструктурний аналіз (рис. 3) засвідчив класичну будову зварного з'єднання, в якому чітко простежується зварний шов та зона термічного впливу, що складається з близькошовної зони (I), нагрітої в процесі зварювання вище критичної точки, та віддаленої зони (II), де, очевидно, основний метал труби був нагрітий нижче критичної точки.

Випробування показали (рис. 4), що зварне з'єднання, яке в межах робочої частини зразка-моделі можна розглядати як композицію "зварний шов-зона термічного впливу" (ЗШ – ЗТВ), має високу пластичність. На це вказує величина та характер зміни параметра $\Delta\epsilon_3$ при збільшенні σ (рис. 4, в), а також кінетика повзучості на ділянці ВС (рис. 5).

Для практичного використання криву напруження – залишкова деформація (рис. 4, в) можна представити у вигляді двох ділянок: нелінійної *oa*, що відповідає збільшенню $\Delta\epsilon_3$ з наростаючою інтенсивністю, та близької до лінійної *ab* зі стабільно високим приростом $\Delta\epsilon_3$ (характеризується кутом β) до рівня напружень $(0,8...0,9) \sigma_{\text{МЦ}}^{\text{Д}}$ (при вищих значеннях σ інтенсифікуються процеси повзучості).

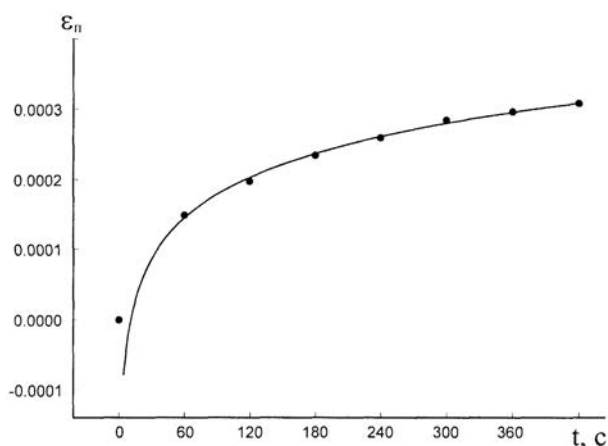


Рис. 5. Повзучість зварного з'єднання на ділянці ВС ($\sigma = 542$ МПа)

Виходячи з теорії приросту деформації, для визначення граничної залишкової деформації $\Delta\epsilon_{\text{ГР}}$, при якій експлуатація зварного з'єднання може вважатися ще безпечною, пропонується такий методичний підхід. Ділянку *ab* продовжують до перетину з віссю ординат і знаходять напруження $\sigma_{\text{ГР}}$, базову точку *n* та відповідно $\Delta\epsilon_{\text{ГР}}$. При заданій схемі та режимах навантаження $\sigma_{\text{ГР}} \approx \sigma_{0,2}^*$, а $\Delta\epsilon_{\text{ГР}} \approx 0,12\%$.

З діаграм згину для композиції ЗШ–ЗТВ (рис. 4) визначали параметри $\sigma_{0,2}^*$, $\sigma_{0,2}^{\text{Д}}$ та $\sigma_{\text{МЦ}}^{\text{Д}}$. Встановлено, що $\sigma_{0,2}^* = 260$ МПа (для основного металу – текстурованої сталі $20\sigma_{0,2}^* = 275$ МПа). Параметр $\sigma_{0,2}^{\text{Д}}$, як і очікувалося, строго залежить від рівня σ в пружно-пластичній області і завжди менший від напруження σ_{max} , що відповідає ділянці повзучості ВС. При збільшенні σ_{max} від 397 до 542 МПа $\sigma_{0,2}^{\text{Д}}$ зростає від 710 до 735 МПа, що можна пояснити збільшенням ділянки деформаційного зміцнення АВ.

Дослідження показали, що пластичність зварного з'єднання, яку добре характеризують параметри $\Delta\epsilon_3$ та $\Delta\epsilon_{\text{П}}$, це незворотний процес, який із самого початку має гістерезисний ефект (рис. 4, а, б). При $\sigma_{\text{max}} = 397$ МПа петля гістерезису виглядає майже закритою і простежується приблизно до половини ділянки O_1A_1 . У випадку, коли $\sigma_{\text{max}} = 542$ МПа, спостерігається повна петля гістерезису, ширина якої, у порівнянні з першим випадком, зростає практично вдвічі.

Можна прогнозувати, що при подальшому розвитку досліджень пластичності композицій ЗШ–ЗТВ запропонованим методом з метою виявлення закономірностей досягнення композицією граничних станів та формування її несучої здатності в умовах експлуатації, виникне потреба у використанні методології структурної механіки руйнування –

нового перспективного напрямку досліджень [20]. Це відкриває шляхи структурної оптимізації зварних з'єднань.

Як результат виконаних досліджень можна сформулювати такі висновки.

1. Експериментально підтверджена можливість прогнозування деформаційної поведінки елемента трубопроводу за даними статичних та повторно-статичних випробувань зразків-моделей методом ступінчастого навантаження з характерними витримками в часі.
2. Віднайдений спосіб визначення при ступінчастому навантаженні частин згином умовної границі текучості $\sigma_{0,2}^*$ – напруження, при якому пластична деформація $\Delta \epsilon_{\text{пл}} = \epsilon_T \cdot 0,002$. Вибір допуску 0,2 % від ϵ_T пов'язується з реальними умовами навантаження морських трубопроводів.
3. Досліджена кінетика низькотемпературної повзучості основного металу та зварного з'єднання труб, що виготовляються зі сталі 20 на зразках-моделях різної конструкції, і встановлено, що в діапазоні напружень $\sigma_{0,2}^* \dots 0,9 \sigma_{\text{мц}}^{\text{д}}$ величина приросту повзучості $\Delta \epsilon_{\text{п}}$ при короткочасних витримках (600 с) є одного порядку з відповідною величиною приросту пластичної деформації $\Delta \epsilon_{\text{пл}}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крижанівський Є. І., Ільницький М. К., Шкіца Л. Є. Передумови втомного руйнування морських нафтогазових трубопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Сер.: Нафтопромислове обладнання. – 1998. – Вип. 35. – С. 3–9.
2. Тахватулин М. А., Хазиев Н. Н. Тенденции развития морского трубопроводного транспорта / Обзорн. инф. Сер.: Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1980. – 72 с.
3. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1986. – 286 с.
4. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 282 с.
5. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
6. 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.
7. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я., Ровіський В. А. Удосконалена автоматизована випробувальна система з ЕОМ для дослідження корозійно-механічного руйнування // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 292–294.
8. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Установа для комплексних досліджень малоциклової втоми матеріалу морських трубопроводів у робочих середовищах // Нафт. і газова пром-сть. – 2001. – № 5. – С. 44–45.
9. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Низькочастотна корозійна втома сталі морських трубопроводів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. № 3. Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів. – 2002. – Т. 2. – С. 794–797.
10. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 33–38.
11. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Прогнозування поведінки матеріалу трубопроводу за даними повторно-статичних випробувань лабораторних зразків-моделей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтогазпромислове обладнання. – 2001. – № 38. – С. 3–8.
12. Крижановский Е. И., Побережний Л. Я. Исследование несущей способности стали морских трубопроводов при низкочастотной усталости // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2001. – С. 1083–1089.
13. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Кінетика деформування сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – № 1. – С. 62–67.
14. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Особливості деформування текстурованої сталі трубопроводу при навантаженні чистим згином // Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. – 2001. – № 1. – С. 57–61.

Інновації при видобуванні та транспортуванні природного газу

15. **Крижанівський Є. І., Івасів В. М., Чернов Б. О., Ільницький М. К.** Вибір і дослідження моделей підводних трубопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтогазпромислове обладнання. – 2001. – № 36, **Т. 4.** – С. 108–114.
16. **Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я.** Спосіб оперативної діагностики зламів матеріалів // Деклараційний патент № 46499А, кл. 7. G01N21/00, G01N3/00. Держдепартамент ІВ, Бюл. № 5. 15.02.2002.
17. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие // Под ред. В. Т. Трощено. – К.: Наук. думка, 1994. – 701 с.
18. **Бородавкин П. П., Синоков А. М.** Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
19. **Капустин К. Я., Камышов М. А.** Строительство морских трубопроводов. – М.: Недра, 1982. – 207 с.
20. **Романив О. Н.** Структурная механика разрушения – новое перспективное направление в проблеме разрушения металлов // Физико-химическая механика. – 1981. – № 4. – С. 28–45.