

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

СТЕПУРЕНКО Віктор Трохимович

В. С. Степуренко

ОПІР ВТОМІ СТАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

В РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

І ШЛЯХИ ЙОГО ПІДВИЩЕННЯ

05.02.02 - машинознавство

та деталі машин

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Одеса 1994

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00778958 (1)

Робота виконана в Одеському державному політехнічному університеті.

- Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Олійник Микола Васильович,
- доктор технічних наук, професор
Мальцев Василь Федорович,
- доктор технічних наук, професор
Шульте Олександр Дришович.

Провідна організація - Науково-виробниче об'єднання
"Кисеньмаш" /м.Одеса/.

Захист відбудеться "22" ЛЮТОГО 1994 р. в 14.00
на засіданні спеціалізованої ради Д 05.06.01 в Одеському держав-
ному політехнічному університеті /270044, м.Одеса, пр.Шевченка,
1/.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського
державного політехнічного університета.

Автореферат розісланий "19" січня 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
к.т.н., професор

І.М.Белоконов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Згідно з статистикою більше 80 % всіх випадків руйнувань деталей машин відбувається з причини втомленості металів. Кожне з таких руйнувань є наслідком одночасної дії періодичних навантажень і зовнішнього середовища. Будь-яке середовище, згідно з його рівнем корозійної активності, станом продуктів корозії та можливості наводнення, в порівнянні з вакуумом зменшує опір сталі втомі. Значна небезпека втомленісних руйнувань деталей машин в робочих середовищах викликала велику кількість досліджень по визначенню впливу окремих факторів, фізичної природи явища та методів захисту від таких руйнувань. Але, не зважаючи на це, і на сьогодні нема єдиної думки на природу зниження опору втомі сталі в робочих середовищах і оцінки впливу окремих факторів на неї. До того ж, ряд запитань дуже далекі від вирішення у зв'язку з суперечністю в тлумаченні окремих явид. Врахування умов роботи деталей машин при їх проектуванні з метою збільшення довговічності є надзвичайно актуальною проблемою.

Мета праці міститься у встановленні залежності опору сталей втомі від впливу різних середовищ для визначення їх працездатності, а також в уточненні природи руйнувань від втоми і можливості судження про доцільність методів підвищення працездатності сталевих виробів в реальних умовах їх експлуатації.

Завдання досліджень.

1. Вивчити залежність опору втомі сталей від корозійного впливу різних середовищ.

2. Встановити дійсну роль поверхнево-активних речовин у зменшенні опору сталі втомі.

3. Визначити залежності водневого окрихчення і водневої втоми сталі від фізичного стану водню в сталі.

4. Визначити вплив частоти навантаження на опір втомі сталей в різних середовищах.

5. Розробити уявлення про природу і механізм втомленісних руйнувань сталі в залежності від впливу робочих середовищ.

6. Обґрунтувати види і оптимальні режими зміцнюючих технологій з метою підвищення працездатності сталевих деталей в умовах періодичних навантажень в різних середовищах.

На захист виноситься.

1. Комплекс отриманих відомостей та закономірностей впливу корозійного, адсорбційного і наводнюючого факторів на опір втомі сталей в різних середовищах при широкому діапазоні частот навантаження.

2. Уявлення про природу і механізм руйнувань сталей від втоми в різних середовищах.

3. Вишукування оптимальних шляхів і методів підвищення втомної довговічності сталених деталей машин, які працюють в різних робочих середовищах.

Наукова новина.

1. Запропонована гіпотеза фізичної природи межі втоми сталі і механізма її втомленісного руйнування в залежності від впливу атмосферних умов.

2. Встановлена висока ефективність дії корозійного середовища малої активності на темпі зниження межі втоми сталі.

3. Одержані залежності витривалості сталі від концентрації в дистильованій воді кисню, хлористого натрію, сірководню та інших речовин.

4. Зроблено новий підхід до оцінки впливу поверхнево-активних речовин на опір втомі пластичних сталей.

5. Встановлена залежність водневого окрихчення і зменшення опору сталі втомі від дифузійно-рухомого атомарного і протонного водню і незалежність від вмісту в ній нерухомого молекулярного водню.

6. Встановлена залежність ефекта частоти навантажень від величини і знаку залишкових напружень в сталі і агресивності середовища.

7. Сформульовані уявлення про механізм руйнування сталей від втоми в умовах корозійного і наводнюючого впливу робочих середовищ.

В і р о г і д н і с т ь отриманих результатів обґрунтовано застосуванням сучасних методів випробувань і вимірів, підтверджено експериментальними закономірностями і перевірено статистичною обробкою.

П р а к т и ч н а ц і н н і с т ь. Результати досліджень дозволяють оцінювати вплив робочих середовищ, оптимально вибирати сталі і зміцнюючі технології та судити про надійність і втому довговічність деталей машин в реальних умовах експлуатації.

1. Встановлено та дано пояснення великому опору корозійній

атомі нержавіючих сталей ВНС-22, ЕП-479 і ЕП-56 і різко негативному впливу концентратів напружень.

2. Визначені оптимальні режими осадження хрому і обміну електроліту в процесі електролізу, що дозволило зменшити з 40 до 4,4% шкідливий вплив зносостійкого електролітичного хрому на опір втомі сталі.

3. Запропоновано спосіб підвищення опору сталі корозійній втомі шляхом багатокомпонентного дифузійного насичення поверхнього шару її бором, хромом і титаном.

4. Встановлена закономірність підвищення ефекту зміцнюючої технології з збільшенням агресивності середовища і дано пояснення цьому явищу.

5. Дана можливість порівняльного аналізу з метою вибору оптимальної зміцнюючої технології поверхнево-пластичним деформуванням, гартування струмом високої частоти і дифузійного насичення сталі для підвищення опору її втомі в робочих середовищах.

Р е а л і з а ц і я р е з у л ь т а т і в. Результати досліджень впроваджені в Одеському обласному виробничому управлінні пасажирського автотранспорту, ВО "Кіровський завод" /м. Санкт-Петербург/, Всесоюзному науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті нафтоперероблюючої і нафтохімічної промисловості /ВНДІПК нафтохім, м.Київ/, Рахівській картонній фабриці і Роздольському ВО "Сірка". Економічний ефект від впровадження результатів досліджень по темі дисертації становить 355 тис. крб. в цінах до 1961 року.

А п р о б а ц і я п р а ц і. Дисертаційна робота розглянута і схвалена на розширеному засіданні кафедри автомобільного транспорту Одеського державного політехнічного університету /23.09.1993/. Основні положення праці доповідались і обговорювались на 31, 32, 34, 35, 36 і 38 звітних науково-дослідних конференціях ОДПУ в 1969, 1970, 1972, 1973, 1974 і 1976 роках; Всесоюзній нараді по корозійній втомі металів /м.Львів, 1966 р./; Республіканській науково-технічній конференції /м.Кишинів, 1973 р./; ІЗ-м семінарі по дифузійним насиченням і покриттям /м.Умань, 1974 р./; 6-й Всесоюзній конференції по фізико-хімічній механіці матеріалів /м.Львів, 1974 р./; Краснодарському політехнічному інституті /1975 р./; Семінарі по фізикохімічній механіці матеріалів /м.Львів, 1980 р./; ЦНДІ залізничного транспорту /м.Москва, 1981 р./; Харківському політехнічному інституті /1984 р./; 4-й республікансь-

кій науково-технічній конференції /м.Одеса, 1991 р./.

П у б л і к а ц і я. По темі дисертації опубліковано 58 друкованих наукових праць, в тому числі одна монографія і одна брошура.

С т р у к т у р а і о б с я г. Дисертація складається із вступу, 7-и глав, загальних висновків, списку використаної літератури і додатка. Праця викладена на 309 сторінках машинописного тексту, 8-и сторінках додатка і містить 82 малюнка, 27 таблиць та 284 найменувань літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У в с т у п і показана актуальність теми дисертації, сформульовані мета та завдання досліджень, викладені основні наукові положення і результати, які виносяться до захисту.

В п е р ш і й г л а в і наведено короткий аналіз літературних джерел про вплив навколишніх середовищ на опір сталей корозійній втомі. На теперешній час загальноприйнято, що зниження опору сталей втомі у більшості робочих середовищ відносно атмосферного повітря відбувається з трьох причин: локального розчинення анодних ділянок металу у верхівці втомної тріщини, адсорбційного полегшення руйнування внаслідок адсорбції поверхнево-активних речовин /ПАР/ з навколишнього рідинного середовища та водневого окрихчення /ВО/ сталі як результату наводнювання.

Великий внесок у вивчення фізико-хімічного впливу різних середовищ на опір сталей корозійній втомі внесли вчені: Д.І.Бабей, С.Г.Веденкін, Л.А.Глікман, О.В.Карлашов, Г.В.Карпенко, А.Б.Куслицький, Д.Г.Ожиганов, М.В.Олійник, В.В.Панасюк, Л.М.Петров, В.І.Похмурський, О.М.Романів, В.В.Романов, О.В.Рябченков, Н.Д.Томашов, М.Й.Чаєвський, Д.Р.Еванс, Б.Уескотт, Т.Екоборі, Р.Н.Паркінс, Е.П'ю і багато інших.

З огляду впливу основних факторів, які викликають корозію, адсорбцію та водневу втому сталей, а також і вивчення вад та недоліків існуючих гіпотез, пояснюючих механізм руйнування сталей при їх періодичному навантаженні у робочих середовищах, поставлені завдання досліджень по дисертації.

В д р у г і й г л а в і викладена методика випробувань сталей на втомленісну міцність та корозійну стійкість.

Найбільш характерним та небезпечним видом навантаження бага-

деталей машин є многократний періодично повторюваний згин. Зв'язку з цим випробування сталей на утому проводилось чистим згином по симетричному циклу при обертанні зразків відповідно до ГОСТ 25502-79. Для цього були використані випробувальні машини НУ, МУІ-6000, ІМА-30 та ІМА-5. Останні були обладнані редукторами для одержання частот навантаження: 0,083; 0,66; 10,0; 47,3; 100,0 і 133,3 Гц. Випробуванню підлягали конструкційні вуглецеві та нержавіючі сталі: 40; 40Х; У8А; У10; ШХ15; 20Х13; ЕІ-96І; ЕП-479; ЕП-56; ВНС-22 та ін., але більшість досліджень виконана на сталі 45, яка до того ж піддавалась термічній обробці на різні структури або ж зміцнювалась різними методами.

Вид і стан робочих середовищ для проведення досліджень визначався умовами експлуатації деталей машин, умовами для вирішення поставлених задач або вимогами виробничих підприємств. Робочими середовищами були: повітря різної вологості, інертні гази, вода та її розчини, мінеральні мастила і т.ін.

Для одержання достовірних та відтворюваних результатів досліджень особлива увага приділялась якості та ідентичності зразків, а також умовам випробувань. Останнє досягалось використанням різноманітних пристроїв для випробування на утому зразків, які обертаються в рідинних середовищах при різноманітній аерації. Дослідження впливу відносної вологості повітря на опір сталі втомі проводилось в спеціально сконструйованій камері, а для випробування в аерозолях морської води була виготовлена спеціальна установка.

Відповідно з ГОСТ 23026-78 по результатам серії випробувань однакових зразків шляхом графічного інтерполірування будували криві втомі сталей у координатах $\sigma - \lg N$. Статистична обробка результатів полягала в визначенні функціональної залежності між амплітудою навантаження та відповідної кількості циклів навантажень до руйнування зразка.

У окремих випадках для порівняння залежності втомної міцності сталей від ступеню агресивності середовища були виконані випробування на корозійну стійкість ваговим методом.

Т р е т ь я г л а в а присвячена дослідженню опору втомі сталей в атмосферних умовах.

Історично склався і знайшов поширене розповсюдження розподіл на "чисту" / "істинну" і корозійну втому сталей. Вважалось, що в атмосферних умовах процес втомі проходить при відсутності корозії.

чи при такому її незначному впливі, який заздалегідь можна не брати до уваги. Це підтверджується тим, що межа витривалості сталі на повітрі не залежить від кількості циклів навантажень і є постійною величиною. Навпаки, у корозійних середовищах права гілка кривої втоми асимптотично наближається до осі абсцис.

Всуперіч цьому корозійний вплив повітря на втому все ж має місце, як це доказано вперше результатами експериментів, наведеними на рис. 1.

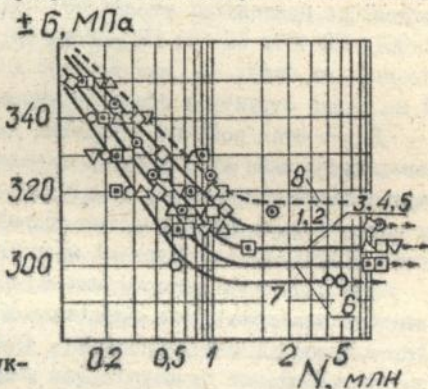


Рис. 1. Вплив середовищ на опір втоми сталі 45 перліт-феритної структури.

Криві втоми, одержані при випробуванні у: 1 - аргоні; 2 - гелії; 3 - азоті; 4, 5, 6 - при ізоляції мастилами: 4 - ФІОЛ-2; 5 - Јога -3; 6 - ЛІТОЛ-24; 7 - повітрі; 8 - глибокому вакуумі /по В.В.Романову/.

Зниження витривалості сталі визначається, по-перше, можливістю доступу кисню повітря до свіжеутворених поверхонь /СУП/, що призводить до їх хімічного окислювання, по-друге, ступенем оборотності деформації на свіжих приступках смуг ковзання в залежності від адсорбції газів чи складових мастил. Отже, звичайні випробування на опір втомі в повітрі є дослідженнями на корозійну втому в умовах дії корозійного середовища малої активності. Про це ж згадував ще К.Р.Еванс. Таким чином, усі середовища, більш-менш, є корозійні і розподіл втоми сталей на "істинну" та "корозійну" є умовним. Проява корозійного впливу малоактивних середовищ на зниження опору втомі, на відміну від активних середовищ, відбувається тільки на лівій гілці кривої втоми сталі.

З метою якісного визначення швидкості окислювання СУП сталі зразки піддавали розриву у спеціальному пристрої, що давав змогу робити це у повітрі, ртуті чи при нанесенні її на місце

руйнування. Виявилось, що після витримки у повітрі СУП близько 0,1 сек, на її поверхні виникає окисна плівка і ртуть в такому випадку на СУП не адсорбується.

До теперішнього часу нема єдиного погляду про фізичну суть межі витривалості сталі у повітрі. На думку Т.Екоборґ, це явище містить у собі більш незрозумілого, ніж механізм утоми в зоні обмеженої довговічності. В зв'язку з цим автором запропоновані погляди на механізм втомного руйнування та гіпотеза фізичної природи межі витривалості у повітрі.

У вакуумі адсорбовані шари на сталі відсутні і руйнування від втоми викликається тільки дією механічного фактора, тому межа витривалості /див.рис.І, крива В/, у порівнянні з результатами випробувань у будь-яких інших середовищах, має найбільшу величину. Механізм втомного руйнування сталей в умовах, виключаючих вплив середовища, викладено в працях В.С.Іванової, В.Ф.Терентьєва, В.Т.Троценко, С.Коцаньда та ін. Для розвитку втомної тріщини у вакуумі необхідна така концентрація напруження, котра б не тільки перевершувала силу зчеплення атомів у її вершині, а і протидіяла дифузійному заліковуванню виникаючих мікронесуцільностей, які володіють значними некомпенсованими силами притягання. Ці умови мають місце при періодичних навантаженнях відповідно лівій гілці кривої утоми. Умовою для появи та існування фізичної межі витривалості сталей у вакуумі є динамічна рівновага, де кількість виникаючих мікронесуцільностей повинно бути рівна або менше кількості усуваних шляхом дифузійного заліковування.

При випробуванні сталі на втому в таких нейтральних середовищах, як чисті аргон, гелій, азот, окрім механічного, діє ще адсорбційний фактор. На СУП сталі, яка виникає також, як і у вакуумі, та має велику активність, відбувається майже миттєва адсорбція інактивного газу та речовин з окисного поверхневого шару. Така адсорбція зменшує рівень поверхневої енергії сталі на СУП, але зниження міцності відбувається внаслідок перепони адсорбованим газом дифузійному заліковуванню ушкоджень від втоми. Це сприяє розвитку тріщини від втоми та руйнуванню зразка. Динамічна рівновага настає при меншому напруженні циклу і межа витривалості сталі в інертному газі на 3...5% нижча, ніж у вакуумі.

В сухому повітрі опір сталі втомі залежить не тільки від механічного і адсорбційного, але й від хімічного фактору. Останній зв'язаний з корозійною активністю повітря і властивостями окис-

ної плівки на сталі. У деякому відношенні окисна плівка захищає ненапружену сталь від подальшого окислення. Але у випадку одночасної дії атмосферного повітря і періодичного напруження, яке перевищує межу витривалості сталі, виникають деформаційні пошкодження окисної плівки - розриви її з появою СВП. В цьому випадку дифузійного заліковування, внаслідок активного окислювання СВП сталі, не відбувається. До того ж ці мікропошкодження являються концентраторами напруги. Багаторазові деформаційні розриви окисної плівки по одному і тому ж місцю та активне окислення СВП сталі перетворюють його з мікропошкодження в одну початкову тріщину від втоми з виникненням розпушення металу перед її вершиною. Післядуюче стрибкоподібне підсохування тріщини відбувається по місцям розривів перемичок між її вершиною і вершинами найбільш близьких мікропор, а також локального окислювального роз'їдання виникаючих ювенільних поверхонь.

Якщо діють нормальні розтягуючі напруження, рівні межі витривалості сталі на повітрі, то зусилля для деформаційних розривів окисної плівки недостатні і хімічний фактор не проявляється. На основі цього по своїй природі межу витривалості сталі у повітрі можна сформулювати як таке максимальне по абсолютному значенню напруження циклу, при якому виключаються хімічні умови зародження і розвитку втомного руйнування внаслідок збереження цілісності окисної плівки та дифузійного самозаліковування виникаючих мікронесуцільностей у поверхневому шарі при необмеженій кількості змін навантаження.

Вперше визначено вплив відносної вологості повітря на опір сталі втомі. Зміна відносної вологості в 40 до 70% не впливає на витривалість сталі в зв'язку з протіканням тільки сухої атмосферної корозії. При критичній відносній вологості /більше як 80% / виникає дуже тонка плівка вологи з великим опором корозійному струму, тому і зниження втомної міцності сталі дуже незначне. Але уже при відносній вологості в 95% і частоті навантаження 0,66 Гц втомна крива набуває характерного виду - без ділянки паралельно осі абсцис. При 100% відносній вологості крапельна конденсація утворює на поверхні зразків досить товсту плівку вологи і в таких умовах відбувається уже типова корозійна втома сталі.

Встановлено, що ефект частоти навантаження виявляється тим значніше, чим менша частота і більша корозійна активність повітря, оскільки він залежить від стану активності і тривалості корозійно-

го процесу у вершині тріщини від втоми.

В четв'яртій главі розглянуто опір сталі корозійній втомі у водних розчинах.

Кисень, розчинений у воді, як енергічний катодний деполаризатор є одним з найбільш головних факторів, який викликає корозію сталей. При усуненні електрохімічної корозії опір сталі втомі у повністю обезкисненій демінералізованій воді на 3,5% вище, ніж при окислювальній дії атмосферного повітря.

Вперше встановлена відсутність прямої залежності між зниженням витривалості сталі і збільшенням агресивності корозійного середовища. Як видно з рис.2, крива , максимальний темп зниження опору сталі втомі виявляється при дуже малих змінах концентрації кисню в дистильованій воді. Наприклад, при добавці до води всього 0,2 см³/л кисню зниження втомного опору, в порівнянні з результатами випробувань в обезкисненій воді, відбулося на 20,4%. Подальше збільшення кисню у воді до 16 см³/л викликає зовсім незначне додаткове зниження опору сталі втомі. Це явище пов'язано з пасивуючою дією плівки продуктів корозії на СУП сталі і відповідним гальмуванням корозійного процесу.

Значне зниження корозійної витривалості сталі надають неокислювальні солі лужних металів /NaCl, KCl, LiCl / у аерованій воді, що відбувається внаслідок підвищення електропровідності розчину і малозахисними властивостями продуктів корозії. У розчинах хлориду натрію, аналогічно наведеному вище, підтверджується відсутність кореляції між зниженням опору сталі втомі і концентрацією солі у воді. Характер зниження темпу витривалості сталі, як видно по кривим 1 і 2 на рис.2, співпадає.

Експериментально встановлено, що опір сталі корозійній утомі в 3%-ному розчині хлориду натрію і в штучній морській воді різних складних рецептів практично однаковий. Встановлено також, що опір сталі втомі в більший мірі залежить від концентрації кисню, ніж від сольового складу в воді. Отже, в залежності від доступу кисню повітря, тобто методики проведення дослідів, значення опору сталі корозійній утомі в розчинах води можуть бути досить різні. Однак у довідкових матеріалах відомості про умови експериментів, як правило, не приводяться, що знижує їх цінність.

При збільшенні концентрації H₂S в сірководневій воді по складній залежності зменшується в ній опір сталі корозійній втомі за рахунок посилення агресивності і водневого окрихчення.

У середовищах з рН = 3,5...9,5 загальна корозія та втомна довговічність сталі мають постійне значення внаслідок виникнення захисної плівки гідроокису заліза $Fe(OH)_2$. Зі зменшенням рН нижче 3,5 знижується опір корозійній утомі та різко збільшуються корозійні втрати сталі у зв'язку з виникненням легкорозчиняємих продуктів корозії і безпосереднього реагування кислоти з залізом. Зі збільшенням рН вище 9,5 повільно знижується швидкість корозії і суттєво збільшується кількість циклів до руйнування, що пояснюється ростом лужності середовища і зменшенням розчинності плівки $Fe(OH)_2$.

Досліджено вплив структурного стану сталі на опір втомі у різних середовищах. Якщо термічна обробка значно підвищує опір втомі в повітрі, то у корозійних середовищах зміцнюючий ефект не спостерігається і зниження витривалості відбувається тим в більшій мірі, чим агресивніше середовище. Особливо слід відмітити низьку корозійно-втомну міцність сталі 45 мартенситної структури. З цього можна зробити висновки: 1/ термічна обробка сталі не може бути засобом підвищення корозійно-втомної міцності, 2/ по межі витривалості сталі у повітрі не можна судити про її корозійно-втомну міцність.

Припускалось, що чим менше неметалевих включень /оксидів, сульфідів, нітридів та ін./ в сталі, тим вище її опір втомі в повітрі і особливо у корозійних середовищах. Для підтвердження цього були досліджені на корозійну стійкість і втомну міцність у 3%-ному розчині хлориду натрію зразки зі сталі ШХ-15 звичайної плавки і після електрошлакового переплаву з покращеною мікро- і макроструктурою. Вперше встановлено, що електрошлаковий переплав підвищує корозійну стійкість сталі на 10...13%, мало впливає на опір утомі в повітрі /збільшення на 2...4% / і досить значно впливає на корозійну втому /підвищення на 23...36% /.

З точки зору практики викликає інтерес визначення опору сталі утомі при різних, і особливо малих, частоті навантаження в різних корозійних середовищах. Результати досліджень, наведені на рис.3, підтверджують той факт, що зі збільшенням корозійної агресивності середовища вплив частоти навантаження на опір втомі проявляється більш різко в порівнянні з менш агресивними середовищами. Зменшення частоти навантаження зменшує інтенсивність корозійного процесу у вершині втомної тріщини, але при цьому більш суттєво збільшується тривалість його дії /у наведених дослідках -

у 71 раз/.

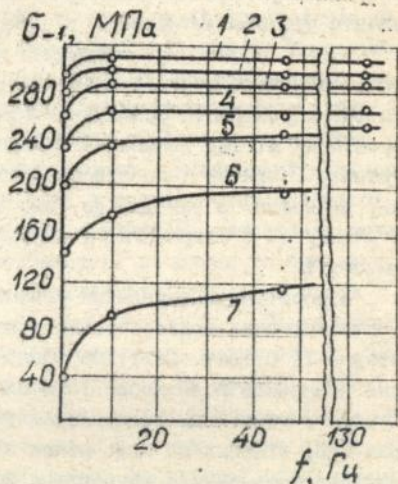
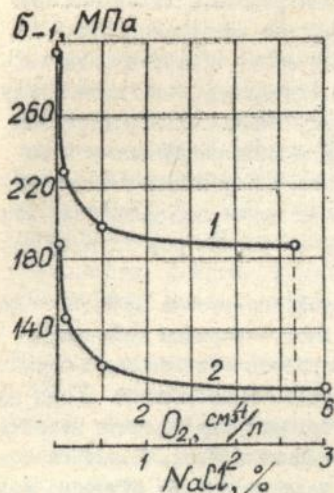


Рис. 2. Залежність межі витривалості нормалізованої сталі 45 від концентрації кисню /1/ і хлориду натрію /2/ у дистильованій воді.

Рис. 3. Залежність межі витривалості нормалізованої сталі 45 від частоти навантаження у середовищах: осушеному азоті /1/; повітрі з відносною вологістю: 40...75 % - /2/; 95 % - /3/; 98 % - /4/; 100 % - /5/; а також при нанесенні дистильованої води на зразок краплями /6/; 3%-ному розчині хлориду натрію у воді /7/.

Єдиного загальноприйнятого трактування процесу втомного руйнування сталі в корозійних середовищах немає. В зв'язку з цим стисло роздивимось природу тільки корозійного впливу середовища на цей процес з моменту виникнення мікронесуцільностей.

При періодичних навантаженнях сталюого зразка у повітрі у ньому під окисним шаром виникають втомні пошкодження, в вигляді мікронесуцільностей - щілин. В зв'язку з евелітними властивостями вони можуть при змиканні дифузійно самозаліковуватись. Якщо такі навантаження відбуваються у воді та водних розчинах, окисна плівка не є перешкодою для проникнення води до мікронесуцільностей. На їх евелітних поверхнях, тобто вільних від захисних окисних плівок, максимально полегшено протікання анодного та катод-

ного процесів. По Н.Д.Томашову, у таких умовах анодна поляризує- мість зменшується на 4 порядки. Кінетика розлагороджування СУП металів суттєво змінюється за дуже короткий час експозиції - $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с. По мірі осадження на СУП сталі гідроксильних плі- вок з продуктів корозії відбувається облагороджування потенціалу. На місці корозійного роз"ідання мікронесуцільностей зароджується корозійний пітінг /виразка/ з концентруванням напружень у його вершині. Розвиток і перетворення пітінга в корозійно-втомну трі- щину зв"язано з виходом до його вершини нових деформаційних мік- ротріщин, що є мікро-СУП, і корозійним локальним роз"іданням по ним сталі.

Відповідно з сучасними уявами корозійно-втомна тріщина - це короткозамкнута гальванопара, у якої анод - вершина тріщини, а катод - її стінки. Постійна ефективна робота гальванопари обумов- лена незначною поляризованістю електродів. Ефективність анода по- зв"язана з постійним відновлюванням у процесі періодичних наванта- жень СУП, вільних на мить появи від окисних плівок. Незначна по- ляризованість катода обумовлена його великою площею відносно роз- мірів анода, а також повсякчасною наявністю катодного деполариза- тора в електродітах. Розвиток корозійно-втомної тріщини звичайно ускладнюється виникненням в районі її вершини великої кількості дрібних тріщин.

Розвиток корозійно-втомної тріщини має дискретний характер. Це зв"язано з наступним. Елементарне підтопування тріщини за од- ин стрибок відбувається внаслідок накопичення напружень біля її вершини і в зв"язку з цим руйнуванням перемички між нею і верши- ною ближньої найбільш розвиненої мікропори шляхом послідовних руй- нувань атомних зв"язків. Виникаючи при цьому СУП сталі зазнає ак- тивного анодного розчинення. В результаті за один стрибок відбу- вається як поглиблення, так і розширення тріщини.

Електрохімічна активація багатьох мікронесуцільностей приво- дить до зародження безлічі тріщин. За час в 5...7 % від довговіч- ності зразка вони перетворюються у розвинені корозійно-втомні трі- щини. Внаслідок руйнування зразка по декількох тріщинах корозій- но-втомний злом має характерний багатоосередковий вигляд.

П" я т а г л а в а присвячена дослідженню впливу поверх- нево-активних речовин /ПАР/ в мастильних вуглеводневих середови- щах на опір сталі втомі.

До сьогоднішнього часу немає загальноприйнятого погляду на

природу і величину впливу ПАР на опір сталі втомі. В зв'язку з цим особливий інтерес має одержання відтворюваних прямих експериментальних даних про вплив ПАР на опір сталі втомі в умовах повного вилучення завуальованого корозійного впливу складових вуглеводневого середовища. З цією метою в процесі випробувань робоча частина зразків знаходилась в герметичних /місткістю 4 см³/ ванночках, виготовлених із еластичного хімічно нейтрального полімера, які заповнювались рідинним мастилом. Мінеральні мастила М-8В₁, М-3В₂, М-10В₂, МС-20 та інші в стані поставки містять в собі деяку кількість води, а також другі ПАР, наприклад, органічні кислоти, спирти, смолисто-асфальтові речовини та присадки. Кожне з таких мастил знижує межу витривалості сталі на 3...8% в порівнянні з результатами випробувань на повітрі. Після збезводнювання мастил шляхом продування через нього нагрітого до 105...110 °С чистого аргону /або просто повітря/ на протязі однієї години, вони, не дивлячись на наявність у них ПАР, не тільки не знижують, а, навпаки, підвищують на 3,5% межу втомі сталі. Можна зробити висновок, що зниження опору пластичної сталі втомі в мастилах стану поставки, яке мало місце і в наших випробуваннях, пояснюється не дією ПАР, а корозійним впливом води, яка знаходилась в них. Можна припустити, що сама вода проявляє себе як ПАР. Для перевірки цієї гадки в мастило МС-20 з слідами води вводили 3% моноетаноламіну в якості інгібітора електрохімічної корозії. В цьому випадку опір сталі втомі виявився таким же, як і при випробуванні в повітрі. Для переконання проведена друга перевірка: при добавлюванні в обезвожене і обезкиснене мастило М-8В₂ і 1% обезкисненої дистильованої води межа витривалості сталі підвищилась на 3% в порівнянні з результатами випробувань в повітрі.

Для з'ясування впливу окислювання мастила на опір сталі втомі мастило М-8В₁ окислювали в спеціальній установці до різних рівней шляхом продувки через нього суміші озона з повітрям /при концентрації озона 30 мл/л/. Кислотне число окисленого мастила становило 0,063, 0,261 і 2,835 мг КОН/г. Випробування сталі на втому проводили в закритих барабанах без доступу атмосферного повітря. Встановлено, що мастило з кислотним числом 0,063 мг КОН/г не тільки не викликало адсорбційного зниження опору сталі втомі, а, навпаки, підвищило його на 3% в зв'язку з обезвожуванням мастила при окислюванні. Більш глибокі окислення мастила призвели до зниження опору сталі втомі на 1,7 і 7,8% /відповідно/ за ра-

хунок підсилення його корозійної агресивності.

Окислення мастила М-ІОГ₂ внаслідок його роботи в дизелі на-проти 5, 25 та 100 годин призвело до відповідного збільшення в ньому концентрації гідроксильних та карбоксильних груп, тобто збільшення кількості ПАР, але це не вплинуло на опір сталі втомі в порівнянні з результатами випробування в чистому мастилі.

Міючі присадки до змазувальних мастил є типовими ПАР. Для з'ясування їх впливу на опір сталі втомі в мастило М-ІОГ₂ для кожного випробування добавляли одну із присадок: ЦІАТІМ-339, МАСК, ВНІІ НР-360 або ДФ-ІІ в кількості 0,1; 0,2; 1,0; 2,0; 5,0 і 10,0%. Випробування показали, що незалежно від марки поверхнево-активної присадки і її концентрації в мастилі адсорбційне пониження опору пластичної сталі 45 втомі не проявляється.

Наведені результати досліджень свідчать про те, що зниження опору пластичної сталі втомі в мінеральних мастилах відбувається не за рахунок адсорбційного впливу ПАР, а в наслідок електрохімічного корозійного діяння на метал води і інших агресивних складових мастил.

Для визначення впливу ПАР і частоти навантаження на опір сталі втомі був проведений слідуєчий дослід. Зразки із сталі перліт-феритної структури випробовувались на повітрі, в н-гептані та в суміші н-гептана з 5% -ми ізобутилового спирту без доступу атмосферного повітря при частоті навантаження 0,66 і 47,3 Гц. Результати досліджень свідчать, що ізобутиловий спирт, як ПАР, зовсім не впливає на опір сталі втомі ні при великій, ні при малій частоті навантаження.

Про вплив ПАР в обезвоженому мастилі МС-20 на опір сталі У8А втомі в залежності від її твердості можна судити по рис.4. Витривалість сталі в мастилі, по відношенню до витривалості в повітрі, виявилась більшою на 3,2% для перліт-феритної і на 1,3% для сорбітної структур. Це пояснюється, з одної сторони, відсутністю адсорбційного зниження втомної міцності пластичної сталі від впливу ПАР, а з другої - виключенням окислювального впливу повітря. Підвищення твердості сталі до НВ = 600 суттєво зменшує витривалість сталі в мастилі.

Пониження опору сталі втомі під впливом адсорбції ПАР можна інтерпретувати, користуючись відомим рівнянням Гриффіта-Орована-Ірвіна

$$\sigma = c \sqrt{\frac{2E(\gamma_1 + \gamma_2)}{l}}$$

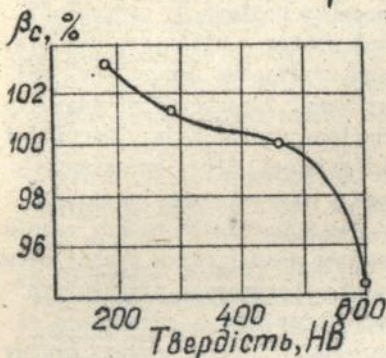


Рис.4. Вплив ПАР у обезвоженому мастилі МС-20 на опір сталі УВА втомі в залежності від її твердості

$$\beta_c = \frac{\sigma_{-1 \text{ в досл. серед.}}}{\sigma_{-1 \text{ в повітрі}}} \cdot 100\%$$

де c - безрозмірний коефіцієнт; E - модуль пружності; γ_1 - істинна енергія матеріалу /енергія розриву атомних зв'язків/; γ_2 - енергія пластичної деформації матеріала у вершині тріщини; l - початкова довжина тріщини. Адсорбція ПАР призводить до зменшення γ_1 і зниження міцності матеріала. Але вплив адсорбції на опір втомі пластичної сталі незначний, бо зниження γ_1 від дії адсорбції на декілька порядків менше за γ_2 . Від цього адсорбційного зниження витривалості сталей перліт-феритної структури експериментально не виявляється. Зі збільшенням твердості сталі до НВ = 285 /сорбітна структура/, а відповідно і падінням її пластичності, частка енергії на деформацію металу γ_2 зменшується. Хімічно інертне мастило не подіяло на витривалість трооститної структури /НВ = 460/. У цьому разі підвищення втомного опору за рахунок виключення корозійного впливу повітря зрівноважилось її адсорбційним зниженням під дією ПАР. Інакше поводить себе сталь мартенситної структури /НВ = 600/. Її витривалість у рідких хімічно-інертних середовищах суттєво нижча, ніж у повітрі. Зниження поверхневої енергії γ_1 при адсорбції ПАР у цьому випадку приблизно таке ж незначне, як і у пластичній сталі, однак енергія γ_2 , витрачаєма на пластичну деформацію крихкої сталі, теж незначна, що дозволяє говорити про їх співрозмірність. Таким чином ефект зниження γ_1 при адсорбції ПАР на високоміцних сталях проявляється у облегшенні розриву міжатомних зв'язків, що в результаті призводить до значного зниження опору сталі втомі.

Механізм зменшення опору пластичної сталі втомі у мастилах, які містять в собі вологу, можна зобразити такою схемою. В місцях контакту краплинок води з поверхнею періодично напруженої сталі іде локальний електрохімічний процес - пітінгова корозія. Пітінгові виразки є первинними концентраторами напруження, які з часом перероджуються у втомні тріщини. Інтенсивність розвитку тріщин лімітується розміром і кількістю часток води у мастилі і доступом їх до СВП сталі у вершині тріщини. Після витрачання у процесі корозії кисню, що міститься у частках води, подальший розвиток втомної тріщини протікає без корозійного впливу середовища. Відсутність нахилу до осі абсцис правої гілки кривої втоми у мастилах, що містять до 0,5% води, пояснюється відсутністю умов для появи СВП сталі через малу агресивність середовища та низькі амплітуди періодичних напружень, які не порушують окисну плівку на зразках. У випадках збільшення вмісту води понад 0,5% істинна межа витривалості сталі в мастилі зникає, бо йде неперервний корозійний процес у вершині тріщини.

У шостій главі наведені дослідження по впливу наводнювання сталей на їх крихкість та опір втомі. Втрату пластичності сталі в зв'язку з попереднім її наводнюванням у сірководневій воді визначали технологічною пробою дротових зразків на перегин, тобто випробуваннями на втому при дуже великих перевантаженнях. Вперше встановлено, що десорбція водню може повністю відновити пластичні властивості сталі незалежно від вмісту у ній молекулярного водню. Відновлення пластичних властивостей залежить від температури та тривалості десорбції водню. Подібні результати одержані також при визначенні пластичності сталі з електролітичними хромовими покриттями. Визначено вплив накладеного потенціалу та відповідного ВО на технологічну пробу сталі перегином у розчинах їдкого натру і сірчаної кислоти.

Дослідження сталі на втому проводились у 3%-вому розчині хлориду натру при накладенні катодного потенціалу. Катодом був зразок, анодом - платиновий дріт. При оптимальній густині катодного струму досягався максимальний опір сталі втомі. Внаслідок наводнювання сталі обмежена витривалість була нижча межі витривалості у повітрі приблизно на 10%. Встановлено, що молекулярний водень, який концентрується у мікронесуцільностях металу і утворює там високі тиски, впливу на опір сталі втомі не чинить.

У вершині втомної тріщини при обмеженому доступі кисню від-

жується гідроліз продуктів корозії, який доводить рН середовища до 3,5...3,8. Таке підкислення нейтрального середовища прискорює процес корозії, а поява водню викликає ВО сталі аналогічно, як це буває при електрохімічній корозії з водневою деполаризацією. На поверхні стінок тріщини іде розряд іонів водню з утворенням адсорбованих атомів водню. Частина цього водню в результаті рекомбінації у молекули потрапляє в атмосферу, а друга проникає в сталь через катодні ділянки і СВП вершини тріщини. При виході протонного водню на межу розділу метал-неметал мікропори він відбирає від "електронного газу" електрони та перетворюється у атомарний водень, який потім рекомбінує в молекулярний. Створений молекулярний водень втрачає свою рухомість і не може вийти з мікропори, оскільки його розміри значно перевершують параметри кристалевої ґратки заліза. Невпинне надходження водню до мікропор приводить до того, що тиск росте й може досягати 100 МПа і більше. Під дією таких тисків виникають трьохвісні напруження, котрі, за поглядом досить широкого кола дослідників, є відповідальними за ВО та водневу втому сталі. Однак, як показують результати наших експериментів, виникнення ВО та зниження опору сталі втомі не зв'язано з підвищеним тиском молекулярного водню у мікропорах. При повному вилученні з сталі рухомого водню і великому тиску молекулярного водню у мікропорах окрихчення не виявляється, а опір втомі поновлюється до початкового значення. При переміщенні дислокацій рухомість атомарного та протонного водню не тільки значно посилюється, але набуває направлення до місць з максимальними розтягуючими напруженнями перед верхів'ям тріщини. З цієї причини, а також з накопиченням водню у несущільностях, розподіл його у сталі досить нерівномірний. Як показав О.Д.Сміян, на віддаленні 1 мм від вершини /у зоні передруйнування/ кількість водню у 5...15 разів перевищує середнє значення його вмісту у металі. Одержана сумарна наявність водню не відображає кількість рухомого водню, що відповідає за ВО сталі.

При досягненні критичного стану ВО та прикладенні розтягуючих зусиль від періодичних навантажень концентрація напруження у перемичці між верхів'ям втомної тріщини і найближчої мікропори набуває значень, що перевищують межу міцності і викликають послідовний розрив атомних зв'язків - руйнування перемички у вигляді елементарного стрибка /підростання/ тріщини. Підростання втомної тріщини може статися як від її вершини, так і з товщі металу. Ба-

гаторазове повторювання такого підrostання виражає дискретний характер розвитку втомної тріщини, котрий завершується втомним руйнуванням наводненої сталі при більш низькому значенні межі витривалості в порівнянні з витривалістю ненаводненої сталі

У главі 7 наведено аналіз шляхів підвищення опору втомі сталей у корозійних середовищах.

Експериментально встановлена залежність між силою тиску на ролики при обкачуванні зразків, глибиною проникнення наклепу та величиною остатніх напружень стиску. З підвищенням цих показників при умові дотримання належної чистоти поверхні збільшується опір втомі сталі. Особливо ефектно обкачування зразків виявляє себе при корозійній втомі завдяки благотворній дії напружень стиску. Встановлено, що оптимальні режими обкачування зразків повністю усувають ефект частоти навантаження при випробуванні сталі на втому в повітрі і майже повністю - у корозійних середовищах.

Поверхнєве зміцнення сталі гартуванням струмами високої частоти є одним з найбільш ефективних засобів підвищення опору втомі як у повітрі, так і особливо у корозійних середовищах, де воно досягає 300% відносно вихідного перліт-феритного стану у відповідному середовищі.

Сульфїдування сталі призводить до різкого зниження її корозійної стійкості, і однак така обробка є ефективним засобом підвищення корозійної втоми. Ще в більшій мірі підвищення витривалості, а також усунення ефекта частоти навантаження відбувається після багатоконцентного дифузійного насичення поверхні сталі бромом, хромом та титаном завдяки утворенню більш значних за величиною та оптимального розподілу у поверхневому шарі напружень стиску.

Електролітичні покриття хрома, які одержані в оптимальних умовах примусової циркуляції електроліта, зменшують опір сталі втомі при випробуванні в повітрі всього на 4,4% /замість 40... 50% після звичайного хромування/ в порівнянні з витривалістю без покриття. Окрім цього, таке хромування у 5...8 разів підвищує продуктивність процесу, забезпечує високу рівномірність покриття хрома, поліпшує його якість та зменшує наводнювання сталі.

Як встановлено, добром хімічного складу і режимів термічної обробки нержавіючих сталей корозійну витривалість можна підвищити у 2 - 3 рази в порівнянні з вуглецевими. Однак ці достоїнства нержавіючих сталей втрачаються при наявності на зразках концентративів напруги. Запропоновані погляди на природу цього явища.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблена гіпотеза виникнення та існування межі витривалості сталі в повітрі. Запропонована формулювка межі витривалості сталі в повітрі як такого максимального по абсолютному значенню напруження цикла, при якому видучені хімічні умови для втомного руйнування внаслідок зберігання цілісності окисної плівки, яка запобігає корозійному впливу повітря, дає можливість для дифузійного самозаліковування утворених під окислювальною плівкою мікронесуцільностей при необмеженій кількості навантажень. Запропоновано погляди на сутність втомних руйнувань сталі у вакуумі, інертних газах та повітрі.

2. Виявлено явище високої корозійної активності слабких корозійних середовищ /наприклад, мастил і спиртів, що містять домішки води, бідистильованої води з домішками кисню чи хлориду натрія/ при одночасній дії на сталь періодичних навантажень. Найбільший темп зниження межі витривалості сталей має місце при досить незначних /соті частки відсотка/ збільшеннях вмісту корозійних агентів у нейтральному середовищі. При незначному збільшенні агресивності середовища темп зниження межі витривалості сталі уповільнюється у окремих випадках більш ніж у 100 разів.

3. Визначено вплив домішок, що містяться у дистильованій воді /наприклад, кисню, хлорида натрія, сірководню, соляної кислоти, ідкого натру/ та рН середовища на опір сталі корозійній втомі. Відмічена особлива велика роль аерації морської води у зниженні опору сталі корозійній втомі. Встановлена залежність корозійної витривалості сталей від термічної та механічної обробки, а також від вмісту в ній неметалевих включень.

4. Сформульовані уявлення про природу втомних руйнувань сталей у різних середовищах.

5. Встановлено, що, на відміну від існуючих уявлень, поверхнево-активні речовини /ПАР/ у вуглекислих середовищах не зменшують опір втомі пластичних сталей. Доказано, що спостерігаєме зниження втомної міцності пластичних сталей в мінеральних мастилах відбувається не за рахунок адсорбційного впливу ПАР, а внаслідок електрохімічної корозійної дії на сталь води та інших агресивних речовин, що знаходяться у цих середовищах.

6. Вперше експериментально доказано, що водневе окрихчення і зниження опору втомі наводненої сталі викликається дифузій-

но-духомим атомарним та протонним воднем і практично не залежать від вмісту в ній нерухомого молекулярного водню. Десорбція рухомого водню /в залежності від тривалості та температури/ приводить до повного відновлення пластичності та витривалості сталі. Виказані погляди про розвиток втомної тріщини наводненої сталі.

7. Встановлено, що ефект частоти навантаження в основному залежить від умов і тривалості протікання корозійного процесу у вершині тріщини. Зі збільшенням агресивності середовища та тривалості його дії ефект частоти посилюється і, навпаки, при усуненні корозії мало проявляється.

8. Визначені оптимальні режими та виконано порівняльний аналіз ефективності зміцнюючих технологій /обкачування роликami, поверхневе гартування струмами високої частоти, дифузійні насичення/ на підвищення опору сталей втомі у різноманітних середовищах. Зміцнюючі технології зменшують чутливість сталі до концентраторів напруження, а у ряді випадків повністю усувають прояву ефекту частоти навантаження внаслідок виникнення у поверхневих шарах зразка напружень стиску, які перешкоджають зародженню і розвитку втомних тріщин.

9. Електролітичні хромові покриття, отримані при оптимальних умовах примусової циркуляції електроліту, зменшують витривалість сталевих зразків при випробуванні в повітрі всього на 4,4 % /замість 40...50% після звичайного хромування/.

10. Вибором хімічного складу та оптимальних режимів термічних обробок ряда нержавіючих сталей опір їх корозійній втомі можна підвищити у 2 - 3 рази в порівнянні з конструкційними вуглецевими сталями. Однак ця перевага нержавіючих сталей втрачається при наявності на зразках гострих надрізів і в цьому випадку вони мало відрізняються від вуглецевих сталей. Виказано припущення про природу цього явища.

Загальний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Степуренко В.Т. Исследование коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности стали 45. - Львов: Изд-во АН УССР, - 1958. - 88 с.

2. Степуренко В.Т. Корозійна стійкість сталі 45 // Деякі питання фізико-хімічної механіки металів. - Київ: Вид-во АН УРСР. - 1958. - С. 88-96.

3. Степуренко В.Т. Корозійно-втомна міцність сталі 45 в

сірководневій воді // Там же. - С. 97 - 105.

4. Ядрок А.И., Степуренко В.Т., Янчишин Ф.П. Приспособление для испытания металла на усталостную прочность в жидких активных средах // Заводская лаборатория. - 1958. - № 2. - 229, 230.

5. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Влияние качества коррозионной среды на коррозионную и коррозионно-усталостную стойкость стали // Вопросы машиноведения и прочности в машиностроении. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1960. - Вып. 6. - С.64- 69.

6. Степуренко В.Т. Влияние сульфидирования на усталостную прочность стали // Там же. - С. 91 - 97.

7. Степуренко В.Т. Выносливость стали в зависимости от величины давления роликов при обкатке // Там же. - С. 98 - 105.

8. Новое в упрочнении металлов накаткой / Г.В.Карпенко и др. - Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1960. - 24 с.

9. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Вплив сірководню на пластичність сталі // Доповіді АН УРСР. - 1960. - № 6. - С. 791-794.

10. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Влияние сероводорода и поляризации на пластичность стали // Журнал прикладной химии АН СССР. - 1961. - Т. 34. - С. 1057 - 1060.

11. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Влияние сероводородной воды на механические свойства стали // Влияние рабочих сред на свойства стали. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1961. - Вып. I. - С.27-33.

12. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Влияние поляризации на пластичность стали // Там же. - С. 34 - 38.

13. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т. Влияние предварительного наводороживания на коррозионную стойкость стали // Там же. - С. 39 - 44.

14. Степуренко В.Т. О склонности стали 45 к коррозионному растрескиванию в сероводородной воде // Там же. - С. 45 - 50.

15. Степуренко В.Т. Об ускоренном методе определения склонности металла к коррозионному растрескиванию // Там же. - С. 51 - 58.

16. Степуренко В.Т., Литвин А.К., Сошко А.И. Испытание проволочных образцов на технологическую пробу перегибов при одновременном наводороживании // Там же. - С. 84 - 87.

17. Степуренко В.Т., Сошко А.И., Литвин А.К. Установка для испытания металла на технологическую пробу перегибом в жидких средах // Машины и приборы для испытания материалов. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1961.

18. Степуренко В.Т., Бабей Ю.И., Карпенко Г.В. К вопросу о влиянии ртути на прочность и технологическую пробу стали перегибом // Вопросы машиноведения и прочности в машиностроении. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1962. - С. 34 - 37.
19. Степуренко В.Т., Литвин А.К., Карпенко Г.В. Влияние pH среды и наложенного потенциала на технологическую пробу стали перегибом // Там же. - С. 51 - 54.
20. Янковский Л.Я., Степуренко В.Т., Бабей Ю.И. Машина ИМА-ИПІ для испытания металлов на усталость при повторно-переменном изгибе в пластической области // Там же.
21. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т., Бабей Ю.И. К вопросу о методике испытания металлов на коррозионную усталость // Заводская лаборатория. - 1963. - № 5. - С. 583, 584.
22. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т., Бабей Ю.І. Залежність корозійно-втомної міцності сталі від умов випробування // Доповіді АН УРСР. - 1963. - № 3. - С. 366 - 368.
23. Степуренко В.Т., Бабей Ю.И. Влияние перемешивания коррозионной среды и доступа воздуха на коррозионно-усталостную прочность стали // Влияние рабочих сред на свойства материалов. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1963. - Вып. 2. - С. 61 - 66.
24. Коррозионная стойкость и усталостная прочность стали ШХ15 электрошлакового переплава / Г.В.Карпенко, В.Т.Степуренко и др. // Там же. - С. 67 - 76.
25. Бабей Ю.И., Степуренко В.Т. Карпенко Г.В. Влияние механической обработки и технологической наследственности на коррозионную стойкость и усталостную прочность стали после ее предварительной коррозии // Там же. - С. 77 - 86.
26. Бабей Ю.И., Степуренко В.Т., Карпенко Г.В. Влияние предварительной коррозии на усталостную прочность стали // Коррозионная усталость металлов. - Львов: Каменяр. - 1964. - С. 74 - 87.
27. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т., Бабей Ю.И. Коррозионно-усталостная прочность стали ШХ15 после электрошлакового переплава // Там же. - С. 105 - 112.
28. Карпенко Г.В., Степуренко В.Т., Бабей Ю.И. О методике испытания металлов на коррозионную усталость // Там же. - С. 155 - 161.
29. Бараковский В.И., Степуренко В.Т., Сахаров М.Г. Влияние гальванического хремирования на водородную хрупкость стали // Новая технология гальванических покрытий /тезисы докладов/. -

Киров. - 1971. - С. 138 - 142.

30. Барановский В.И., Степуренко В.Т., Сахаров М.Г. Пластичность стали с электролитическими хромовыми покрытиями // Физико-химическая механика материалов. - Киев: Наукова думка, - 1972. - № 2. - С. 15 - 18.

31. Степуренко В.Т., Стрижак Л.Н. Установка для испытания металлов на усталость в атмосфере воздуха различного состава и разной влажности // Там же. - С. 93, 94.

32. Степуренко В.Т., Барановский В.И., Манаенко В.П. Влияние качества электролитического хромового покрытия на выносливость стали // Физико-химическая механика материалов. - Киев: Наукова думка. - 1972. - № 4. - С. 15 - 18.

33. Степуренко В.Т., Стрижак П.Н. Влияние атмосферной влаги на усталостную прочность стали 45 // Физико-химическая механика материалов. - Киев: Наукова думка. - 1973. - № 1. - С. 114, 115.

34. Степуренко В.Т., Барановский В.И. Влияние технологических факторов гальванического хромирования стали на ее водородную хрупкость // Физико-химическая механика материалов. - Киев: Наукова думка. - 1973. - № 3.

35. Степуренко В.Т., Проскуряков Г.Т., Сахаров М.Г. К вопросу о влиянии смазочных материалов на выносливость стали // Физико-химическая механика материалов. - Киев: Наукова думка. - 1973. - № 2.

36. Степуренко В.Т., Стрижак П.Н. Камера для испытания металла на усталостную прочность в атмосфере влажного воздуха // Заводская лаборатория. - 1973. - № 2. - С. 232, 233.

37. Свойства многокомпонентных покрытий на основе бора / Р.Л.Коган и др. // XIII семинар по диффузионному насыщению и покрытиям /тезисы докладов/, АН УССР. - Умань. - 1974.

38. Степуренко В.Т. К вопросу о влиянии поверхностно-активных веществ на выносливость стали // VI Всесоюзная конференция по физико-химической механике конструкционных материалов /тезисы докладов/. - Львов. - 1974. - С. 66 - 68.

39. О коррозионном влиянии смазочных масел на выносливость стали / В.Т.Степуренко и др. // Избирательный перенос при трении. - М.: Наука. - 1975. - С. 78 - 83.

40. К вопросу о влиянии воды в минеральных смазочных маслах на выносливость стали / В.Т.Степуренко и др. // Защита металлов.

- 1975. - № 2. - С. 155 - 158.

41. Борохромирование как метод повышения усталостной и коррозионно-усталостной прочности стали / Р.Л.Коган и др. // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наукова думка. - 1976. - С. 100 - 102.

42. О влиянии поверхностного наклепа на усталостную и коррозионно-усталостную прочность стали / В.Т.Степуренко и др. // Защита металлов. - 1976. - № 4. - С. 429 - 433.

43. Устройство для испытания металла на усталостную прочность в распыленных растворах / М.Г.Сахаров, В.Т.Степуренко и др. // Заводская лаборатория. - 1976. - № 10. - С. 1257, 1268.

44. Степуренко В.Т., Стрижак П.Н. Влияние атмосферной влаги и частоты нагружения на усталостную прочность стальных деталей // Детали машин. - Киев: Техника. - 1977. - С. 72 - 74.

45. Степуренко В.Т., Стрижак П.Н. Влияние частоты нагружения и смазочных масел на выносливость нормализованной стали // Детали машин. - Киев: Техника. - 1978. - С. 31 - 34.

46. О коррозионно-усталостной прочности деталей из нержавеющей сталей / В.Т.Степуренко и др. // Там же. - С. 34 - 38.

47. К вопросу о влиянии среды на выносливость стали / В.Т.Степуренко и др. // Защита металлов. - 1978. - № 6. - С. 706 - 709.

48. К вопросу о природе разрушения поршневых колец / В.Т.Степуренко и др. // ОПИ. - Одесса. - 1989. - 5 с. - Деп. в УкрНИИТИ 22.08.89. - Деп. № 1940. - Ук. 88.

49. Дашенко А.Ф., Степуренко В.Т., Степуренко Ю.В. Коррозионная гипотеза существования предела выносливости стали в воздухе. // Повышение надежности и долговечности машин и сооружений. IV респуб. научно-техн. конф. /тезисы докладов/: - Киев. - 1991. - Часть I. - С. 73 - 75.

50. Степуренко В.Т., Степуренко Ю.В. Особая роль малых примесей коррозионных агентов в воде на сопротивление усталости стали // Там же. - Часть 2. - С. 89, 90.

51. Влияние состояния водорода в стали на ее водородное охрупчивание и сопротивление усталости / А.Ф.Дашенко, В.Т.Степуренко и др. // ОПИ. - Одесса. - 1992. - 6 с. - Деп. в УкрНИИТИ 07.05.92. - Деп. № 615. - Ук. 92.

AB 29.383