

ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ПРАВДА Михайло Іванович

УДК 539.422.24:537.533.2

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ВТОМЛЕНОСТІ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ
МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ**

Спеціальність 01.04.13 - фізика металів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Запоріжжя 1996



Робота виконана в Запорізькому державному технічному
університеті

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Левітін В.В.

Офіційні опоненти:

1. Доктор фізико-математичних наук, професор

Пішак В.К.

2. Доктор технічних наук, професор

Левінзон Д.І.

Провідна установа: Донецький державний університет

Захист дисертації відбудеться " 26 " вересня 1996 р.

о 15 годині на засіданні Спеціалізованої вченої Ради К 08.04.01
при Запорізькому державному університеті за адресою: 330600,
Запоріжжя, вул. Жуковського, 66.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці
Запорізького державного університету.

Автореферат розіслано " " серпня 1996 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Ради К 08.04.01,
кандидат фізико-математичних наук

Швець Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Відомо, що більшість випадків руйнування деталей машин і конструкцій відбуваються завдяки втопленості матеріалів, тобто при механічних напруженнях, менших ніж межа плинності, але таких, що повторюються багато разів. Таким чином, всебічне дослідження втопленості являє собою важливе технічне завдання. Прогрес на шляху запобігання втопленості лімітується двома причинами: по-перше, недостатньо розробленими фундаментальними механізмами явища, і по-друге, нестачею нових надійних методів реєстрації та дослідження.

Ця робота пропонує новий метод дослідження втопленості металевих матеріалів за допомогою вимірювань роботи виходу електронів. Завдяки використанню метода стає можливим подальша розробка механізмів втопленості, а також прогнозування її розвитку на початкових стадіях процесу.

МЕТА І ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Робота присвячена обґрунтуванню можливості використання однієї з найважливіших фізичних характеристик матеріалу - роботи виходу електронів ϕ - для дослідження втопленості металевих матеріалів та проведенню саме цих досліджень.

Відповідно поставленій меті завданнями роботи були:

- розробка та виготовлення нової експериментальної установки, яка б дозволяла співвіднести випробування на втопленість з вимірюваннями ϕ ;
- експериментальний доказ положення про чутливість роботи виходу

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

до структурних перебудов кристалічної ґратки матеріалу під час знакозінних механічних навантажень; дослідження процесів втопленості;

- розробка нового методу прогнозування втопленості на початкових стадіях процесу;

- удосконалення теоретичних моделей розвитку втопленості.

НАУКОВА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ

Експериментальні результати, які були одержані в роботі, розширюють уявлення про фундаментальні механізми втопленості металевих матеріалів.

Застосування роботи виходу електронів для дослідження явища втопленості дає можливість прогнозування на початкових стадіях процесу місця і часу майбутнього утворення тріщини втопленості.

НАУКОВА НОВИЗНА

1. Робота виходу є чутлива фізична величина до структурних змін, що передують втопленості. Розроблена методика вимірювань ф дала можливість надійної реєстрації цих структурних змін.

2. Під час освітлювання зразка ультрафіолетовим випромінюванням на його поверхні встановлюється новий рівень рівноваги адсорбції-десорбції, який можна контролювати. Це дозволяє визначати структурну складаючу роботи виходу з достатньою точністю.

3. Упругі розтягуючі напруження, що діють на поверхні зразка при вигині, приводять до деякого росту, а стискуючі - до падіння роботи виходу. Існує кореляція між нешою витривалості σ_{-1} та роботою виходу ϕ : чим менше ϕ , тим більше σ_{-1} .

4. Під час впливу на металевий матеріал циклічних навантажень в області майбутнього зародження і розвитку тріщин втоиленості спостерігається зменшення ϕ . Цей результат одержано на алюмінії, сплаві титану марки ВТЗ-1, на ряді жаронічних сталей.

5. Зменшення роботи виходу у області зародження і розвитку тріщин втоиленості пов'язане із зростанням атомарної шорсткості поверхні під час виходу на неї дислокацій і обуквленим цим підвищенням рівня Фермі. Запропоновано теоретичну модель росту густини дислокацій під час циклічного навантаження металу. Теоретичні оцінки параметрів моделі задовільно узгоджуються із даними експерименту.

ПОЛОЖЕННЯ, ЩО ВИНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ

1. Робота виходу електронів ϕ є чутлива характеристика до структурних перебудов, що мають місце в металевих матеріалах під час втоиленості.

2. Існує кореляція між величиною ϕ та залишковими стискуючими напруженнями 1-го роду на поверхні металу, а також між ϕ та межою витривалості: зменшення значень ϕ відповідає росту цих обох величин.

3. На початкових стадіях випробувань у області майбутнього зародження руйнування при втоиленості спостерігається суттєве зниження роботи виходу електронів. Це дає можливість раннього прогнозування місця, часу появи та розвитку тріщини втоиленості.

4. Зменшення значень роботи виходу електронів під час циклічного навантаження та розвитку змін структури, що передують руйнуванню втоиленості, пов'язане із зростанням густини

дислокацій, їх виходом на поверхню та утворенням поліатомних ступенів.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ.

Головні результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях:

1. "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" - науч.-тех. конф., 23-25 сент., 1992г., Запорожье.

2. "Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения" - науч.-тех. конф., 28-30 окт. 1992г. - Киев.

3. "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" - науч.-тех. конф. 27-29 сент., 1995г. - Запорожье.

ПУБЛІКАЦІЇ

За темою дисертації опубліковано 7 наукових праць в наукових журналах та збірниках. Подано заявку на видачу патенту України на винахід.

СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку цитованої літератури із 135 назв. Загальний обсяг роботи склав 156 сторінки, у тому числі 47 малюнків та 2 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

ВСТУП

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і завдання роботи, її новизна та практична цінність, а також положення, які виносяться на захист.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Перший розділ роботи освітлює стан питань, які стосуються сьогоденних поглядів на еволюцію структури металів при втоюленості, а також дає обзор методів дослідження явища втоюленості.

2. МАТЕРІАЛИ І ЗРАЗКИ. ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вибір матеріалів, що використовувалися в роботі, був зумовлений як науковими, так і прикладними завданнями. Для вивчення процесу накопичування втоюлених пошкоджень в процесі циклічного навантаження було вибрано алюміній завдяки його добрій вивченості, легкості обробки та гарним енісійним властивостям. Для наближення результатів фізичних досліджень до потреб виробництва було досліджено сплав на основі титану марки ВТЗ-1, а також спеціальні сталі марок ЗП866, ЗП479, ЗИ736, які використовуються в моторобудуванні.

В роботі було використано зразки шести типів: плоскопаралельні зразки розмірами 5x10x75 мм та 2,5x12x80 мм відповідно для сплаву титана і алюмінія; зразки в формі плоскої одинарної лопатки 2,5x100 мм і шириною робочої частини 10 мм.

виконані з сталей марок ЗП866, ЗП479, ЗИ736 та сплаву ВТЗ-1; зразки-імітатори лопаток виконані з сталей марок ЗП866, ЗП479 10x93 мм і товщиною робочої частини 1мм; циліндричні зразки довжиною 110 мм і діаметром робочої частини 8 мм, виконані з сталей марок ЗП517, ЗП866; плоскі зразки для розтягування 2.5x60 мм і шириною робочої частини 3 мм. На частині зразків були наведені залишкові стискуючі напруження, для чого зразки закріплювалися в кюветі, яка містила в собі бій шліфовальних кругів та сталеві кульки. Кювета піддавалася коливанням; амплітуда, частота та час обробки варіювалися.

Нани розроблена і зібрана оригінальна експериментальна установка, яка дозволяла досліджувати кінетику втопленості металів за допомогою вимірювань ϕ . Установка включала в себе вібростенд та вимірювальну систему для дослідження розподілу та еволюції ϕ під час випробувань на втопленість. Переважно більшість випробувань на втопленість було виконано за схемою синетричного знакозмінного вигину при резонансних частотах 320 - 950 Гц. Були також проведені випробування на розтягування і на розтягування з крутінням. В результаті випробувань знаходилась нежа витривалості σ_{-1} і довговічність зразків.

При розробці методики вимірювань особливу увагу було звернено на вплив середовища на величину ϕ . Для цього під час попередніх вимірювань зразки вищалися в парі деяких активних речовин. В результаті проведених досліджень було зроблено висновок, що вимірювання ϕ в повітрі дозволяють вивчати структурні перебудови в металах під час циклічних навантажень; при цьому треба виконувати певні методичні правила. Зокрема, доцільно досліджувати не самі абсолютні значення ϕ , а їх зміни.

що відбуваються в результаті структурних перебудов. Похибка вимірювань $\Delta\phi$ не перевершувала 3 мЕВ.

Методом рентгеновської дифрактометрії вимірювалися залишкові макроскопічні напруження $\sigma_{\text{ост}}$ на поверхні зразків. Використовувався метод побудови експериментальної залежності подвійного брегівського кута 2θ від $\sin^2\psi$, де ψ - кут нахилу нормалі до відзеркалюючих площин до нормалі к поверхні зрізця. Зйонка велася при 4 - 5 значеннях ψ . Обробка даних експерименту та побудова графіків велася за допомогою ЕОМ, яка працювала на лінії з рентгеновською установкою. Залежність " $2\theta - \sin^2\psi$ " була лінійною.

Напруження $\sigma_{\text{ост}}$ розраховувались за формулою:

$$\sigma_{\text{ост}} = - \frac{E}{2(1+\nu)} \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)},$$

де E - модуль Юнга, ν - коефіцієнт Пуасона.

Структура частини зрізців сталей після випробувань на втомленість була піддана дослідженню методами дифракційної електронної мікроскопії¹⁾.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЮВАННЯ

3.1 Вплив пружних напружень на величину роботи виходу електронів

Величина роботи виходу електронів залежить від ряду факторів і може бути відбита як: $\phi = \phi_0 + \Delta\phi_{\text{ads}} + \phi_{\text{el}} + \Delta\phi_{\text{def}}$, де ϕ_0 - робота виходу ідеальної металеві поверхні; $\Delta\phi_{\text{ads}}$ - інкремент роботи виходу, обумовлений адсорбцією газових молекул; $\Delta\phi_{\text{el}}$ - зміна роботи виходу під впливом пружних напружень; $\Delta\phi_{\text{def}}$ - зміна роботи виходу, що обумовлена впливом дефектів кристалічної ґратки.

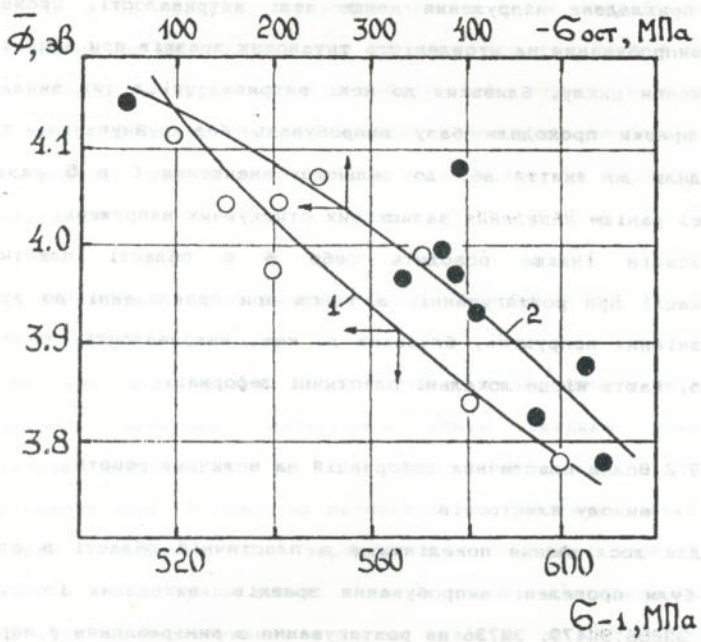
¹⁾ Спільно з Російським інститутом авіаційних матеріалів.

Величина $\Delta\phi_{\text{одс}}$ під час наших досліджень підтримувалась постійною в межах похибки вимірювань. Як було показано на зразках, виконаних із алюмінія, пружні стискуючі напруження приводять до деякого росту ϕ : приблизно на 5 мЗВ на 1% деформації. Та сама тенденція була знайдена при статичному навантаженні на вигин титанових зразків, в той час як стискуючі напруження на протилежній поверхні зразка приводили до деякого падіння ϕ . Одержані значення $\Delta\phi_{\text{ст}}$ що до пружних напружень обох знаків не перевершували 10 мЗВ. Після того як навантаження знімалися, поверхня швидко релаксувала до початкових значень ϕ .

Крива 2 мал.1 ілюструє залежність ϕ від залишкових стискуючих напружень - $\sigma_{\text{ост}}$ на поверхні титанових зразків, які були знічені поверхневою віброобробкою різної інтенсивності. З графіка видно, що зростання - $\sigma_{\text{ост}}$ приводить до зменшення ϕ . Представлені на графіку експериментальні точки були одержані подвійним усередненням: по поверхні кожного зразка в небезпечній області і по кожній серії зразків.

Вимірювання ϕ на сталених зразках-інітаторах лопаток ГТД, які не випробувалися на втомленість, показали, що ультразвукове знічення поверхні зменшує значення ϕ в середньому на 30 мЗВ, тобто стискуючі напруження на поверхності деталей приводять до зменшення ϕ . Таким чином, експериментальні данні, які були одержані на титановому сплаві і на сталях, узгоджуються між собою.

При випробуваннях на втомленість титанових зразків була знайдена кореляція між ϕ та межою витривалості σ_{-1} : зростання σ_{-1} супроводжувалося зменшенням ϕ - кр.2 мал.1. Таким чином, узгоджуються відомі уявлення щодо позитивного впливу залишкових



Мал.1. Кореляції між величинами ϕ і $\sigma_{ост}$ (крива 1), а також між ϕ і $\sigma_{ост}$ (крива 2) для зразків, виконаних із сплава титана марки BT3-1. Кожна точка графіку відповідає одній серії зразків; серії зразків було оброблено різними упрочнюючими обробками поверхні.

стискуючих напружень на підвищення міцності металів при втоиле-
ності та одержані кореляційні залежності ϕ від σ_{-1} і ϕ від σ_{osc}

Експериментально встановлено, що прикладені до металу
знакозмінні навантаження прискорюють можливі процеси релаксації в
ньому, такі, наприклад, як зняття залишкових напружень у випадку,
якщо прикладене напруження менше ніж витривалості. Проведені
нами випробування на втоилість титанових зразків при амплітудах
напруження циклу, близьких до ніж витривалості, в тих випадках,
коли зразки проходили базу випробувань без руйнування, також
приводили до зняття або до сильного зменшення (в 5 разів і
більше) раніше наведених залишкових стискуючих напружень.

Зовсім інакше поводить себе ϕ в області пластичної
деформації при розтягуванні, а також при прикладенні до зразка
знакозмінних напружень, близьких до ніж витривалості, коли, як
відомо, мають місце локальні пластичні деформації.

3.2 Вплив пластичних деформацій на величину роботи виходу електронів

Для дослідження поведінки ϕ в пластичній області в сталях
нами були проведені випробування зразків, виконаних із сталей
марок ЭП866, ЭП479, ЗИ736 на розтягування з вимірюванням ϕ перед і
після навантаження. Зразки навантажувались до появи шійки, де
деформація сягала 20 - 30%. Розподіл ϕ по довжині зразка
зіставлявся з початковим розподілом до випробувань. Виявилось, що
в області пластичної деформації має місце зменшення ϕ , більше в
тих точках поверхні зразка, де більш інтенсивні деформації мали
місце. Так, посередині шійки спад ϕ був максимальним і сягав 100
- 150 мєВ.

За допомогою вимірювань ϕ було досліджено релаксаційні процеси на поверхні сталевих зразків після їх випробувань. Релаксація практично завершувалася приблизно через 20 годин після навантаження. Про це свідчило повне співпадання кривих розподілу ϕ через 20 і 88 годин після навантаження. Характер релаксації розподілу ϕ по поверхні сталевих зразків після випробувань на розтягування ще раз підтверджує висновок про те, що значення ϕ обумовлюються, в першу чергу, особистостями структури металу в даних точках поверхні. Процеси адсорбції-десорбції на поверхні не грають рішучої ролі, а є вторинними після впливу на ϕ структурних перебудов.

3.3 Розподіл роботи виходу електронів поблизу

тріщин втопленості

Як вже відмічалось вище, згідно сьогоденним уявленням, втопленість металевих матеріалів існує завдяки локальним пластичним деформаціям, що мають місце переважно в тонкому поверхневому шарі. В областях матеріалу, де пластична течія мала найбільшу інтенсивність, зароджуються тріщини втопленості. Виходячи з літературних даних, а також з наших експериментальних результатів по розтягуванню сталевих зразків, що обговорювалися вище, природно припустити зменшення ϕ в районі майбутнього формування тріщин втопленості, оскільки там мають місце локальні пластичні деформації. З метою перевірки цього припущення нани було проведено дослідження розподілу ϕ на ряді металевих матеріалів.

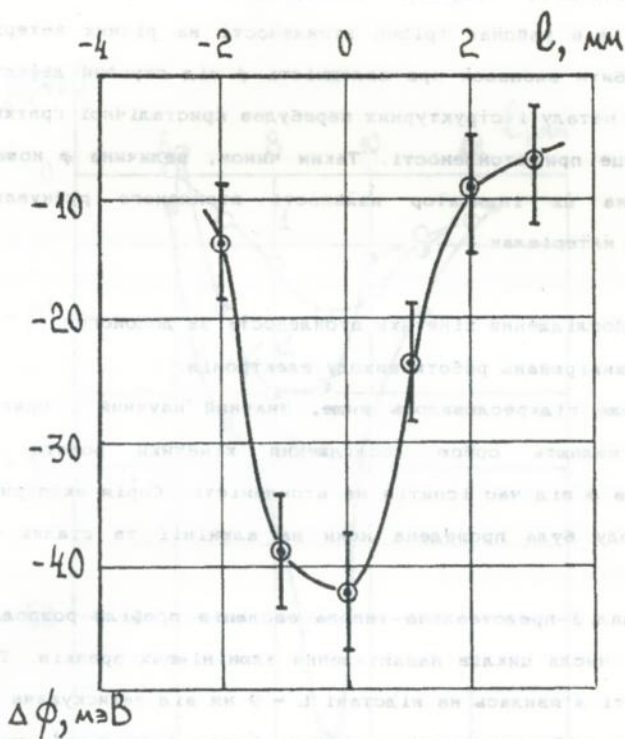
Серія алюмінієвих зразків була випробувана на симетричний знакозмінний вигин до виникнення тріщини втопленості. Перед

випробуваннями і після них на поверхні зразків було виміряно розподіл роботи виходу. Для різних зразків число циклів до руйнування коливалося в межах від 2×10^6 до 7×10^6 . Виявилось, що в районі тріщин втопленості на всіх зразках без виключення існує мінімум роботи виходу. Мінімум ϕ на деяких зразках сягав 200 мев, а його середнє значення було 150 мев. Присутність на поверхні тріщини втопленості величина ϕ відчувала на відстані 2 - 3 мм від самої тріщини. Існування мінімуму роботи виходу електронів в області тріщини втопленості цілком згідне з уявленнями про визначну роль локальних пластичних деформацій в явищі втопленості.

Звертає на себе увагу той факт, що із зростанням числа циклів навантаження мінімум ϕ поглиблюється. Можливо, що це пов'язане із зростанням ступеня насичення дефектами структури приповерхневого шару металу. На поверхні в результаті елементарних актів ковзання утворюється все більше атомних ступенів. Внаслідок чого робота виходу електронів зменшується.

Розподіл ϕ в районі тріщин втопленості на зразках, виконаних з титанового сплаву ВТЗ-1, в головних рисах виявився аналогічним розподілу, що був одержаний на алюмінії. Так само як і в випадку з алюмінієм, тріщина виявляла свою присутність в областях, що відстояли від неї на відстані 2 - 3 мм. Але на титанових зразках глибина мінімуму ϕ була менше в порівнянні з алюмінієм. На графіку, який представлено на мал.2, координата $L = 0$ мм також відповідає місцю утворення тріщини. Крива, яку представлено на графіку, одержана усередненням значень ϕ по серії з 22 однотипних зразків.

Дослідження розподілу ϕ по поверхні сталевих зразків



Мал.2. Розподіл роботи виходу електронів поблизу тріщини втонленості на серії із 22 зразків, виконаних із титанового сплаву марки ВТЗ-1. Координата $L = 0$ мм відповідає координаті тріщини.

показало наявність мінімуму в районі тріщин втопленості глибиною 30 - 40 нЗВ, а в деяких випадках і більш глибокого.

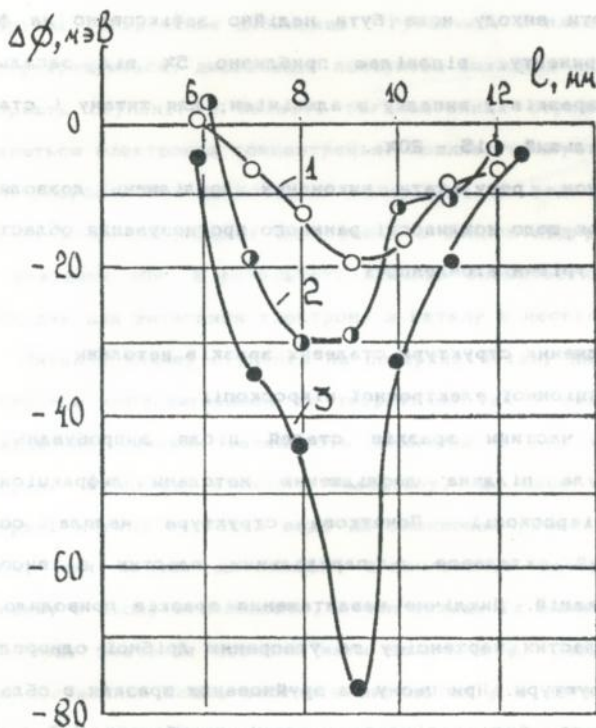
Узагальнюючи одержані експериментальні результати щодо розподілу ϕ в районах тріщин втопленості на різних матеріалах, можна зробити висновок про залежність ϕ від ступеня дефектності структури металу і структурних перебудов кристалічної ґратки, які мають місце при втопленості. Таким чином, величина ϕ може бути використана як індикатор наявності втопленого руйнування в металевих матеріалах.

3.4 Дослідження кінетики втопленості за допомогою вимірювань роботи виходу електронів.

Як вже підкреслювалось вище, значний научний і практичний інтерес являють собою дослідження кінетики роботи виходу електронів ϕ під час іспитів на втопленість. Серія експериментів такого роду була проведена нами на алюмінії та сталях різних марок.

На мал.3 представлена типова еволюція профіля розподілу $\Delta\phi$ при рості числа циклів навантаження алюмінієвих зразків. Тріщина втопленості з'явилась на відстані $L = 9$ мм від затискувача зразка і саме на цій координаті спостерігається найбільший спад $\Delta\phi$: криві 1, 2 і 3 одержані при $N = 10^5$, 6.6×10^5 і 2×10^6 циклів навантаження відповідно. Підкреслимо, що криві 1 і 2 одержані при постійній резонансній частоті коливань, тобто саме тоді, коли власне тріщини втопленості ще не існує, але тривають процеси, що готують її появу.

Виявилось, що існує залежність величини ϕ від числа циклів навантаження N , а у випадку, коли значення амплітуди напруження



Мал.3. Еволюція розподілу роботи виходу електронів по поверхні зразка, виконаного із алюмінія, під час іспитів на втомиленість. Тріщина втомиленості з'явилась на координаті $L = 9$ мм. Число циклів навантаження для кривих: 1 - 10^5 , 2 - 6.6×10^5 , 3 - 2×10^6 .

циклу близьке до неї витривалості матеріалу, в районі майбутньої тріщини втопленості із зростанням N_f зменшується. На алюмінії цей спад сягає 100 - 300 неВ, на титані і на сталях, поіменованих вище, - 30 - 60 неВ. Початок спаду ϕ , тобто інтервал часу, коли зменшення роботи виходу може бути надійно зафіксовано на фоні помилки експерименту, відповідає приблизно 5% від загальної довговічності зразків у випадку з алюмінієм; для титану і сталей цей час дещо більший - 15 - 20%.

Таким чином, результати виконаних досліджень дозволяють зробити висновок щодо можливості раннього прогнозування області і часу утворення тріщин втопленості.

3.5 Дослідження структури сталевих зразків методами дифракційної електронної мікроскопії.

Структура частини зразків сталей після випробувань на втопленість була піддана дослідженню методами дифракційної електронної мікроскопії. Початкова структура являла собою мартенсит, який складався з паралельних пластин з високою густиною дислокацій. Циклічне навантаження зразків приводило до фрагментації пластин мартенситу та утворенню дрібної однородної субзеренної структури. При цьому на зруйнованих зразках в області тріщин втопленості було зафіксовано розміри субзерен 0.2 - 0.5 мкм при загальному зростанні густини дислокацій. А на зразках, що пройшли базу випробувань при менших напруженнях циклу розміри субзерен були дещо меншими - 0.1 - 0.2 мкм.

4. РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ. ЗРОСТАННЯ ГУСТИНИ ДИСЛОКАЦІЙ В МЕТАЛІ ПІД ЧАС ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В результаті впливу прикладених знакозмінних навантажень в матеріалі генеруються дислокації. Рухаючись в площинах ковзання, що перехрещуються, дислокації поступово виходять на поверхню, де утворюють ступені. В області багатоатомних ступенів, очевидно, змінюється електронна концентрація. Можливо припустити виникнення субмікросорсткості на поверхні матеріалу, що веде до послаблення зв'язку колективізованих електронів з іонною підґраткою поблизу від вказаних зон. В результаті повинна зменшуватися енергія, що необхідна для витягання електрону з металу в нескінченність.

Питання впливу ступенів на поверхні металу на роботу виходу електронів досліджувалося як теоретично так і експериментально. Дослідження виявили залежність величини ϕ від присутності на поверхні ступенів атомного масштабу, а саме: наявність на поверхні металу ступенів веде до зменшення роботи виходу. Таким чином, чим більше дислокацій з'явилося в матеріалі під час розвитку в ньому втомиленості, і чим більше їх вийшло на поверхню, тим менші значення повинна мати величина ϕ . Очевидно, що саме цією обставиною можна пояснити зменшення ϕ в металі під впливом знакозмінних механічних навантажень, яке було зареєстровано в даній роботі.

Нами було проведено теоретичне дослідження зростання густини дислокацій під час знакозмінного навантаження.

Дислокації мають можливість рухатись, якщо величина прикладеної механічної напруги перевершує деяке, так зване, стартове напруження τ . Одержано наступне рівняння:

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = \delta V_0 e^{-\frac{U_0 + \gamma \tau_m}{k T}} \int_{t_{so}}^{t_{ef}} e^{-\frac{\gamma \tau_m \sin \omega t}{k T}} dt,$$

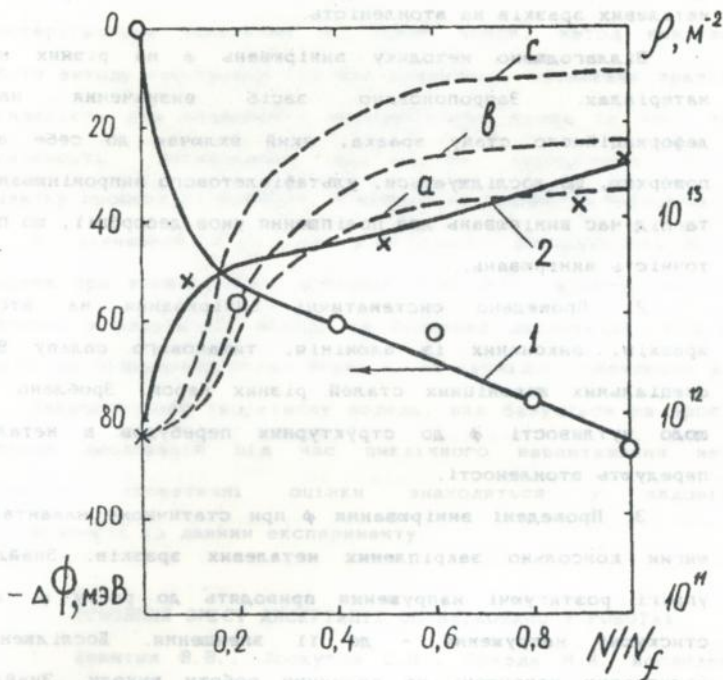
де ρ_0 - початкова густина дислокацій; δ - коефіцієнт розмноження; V_0 - передекспоненційний множник; U_0 - енергія активації руху дислокацій; γ - активаційний об'єм; $\tau_m \sin \omega t$ - прикладене напруження; t_{so} та t_{ef} - час початку та кінця руху дислокацій у циклі.

Одержане рівняння дозволяє визначити густину дислокацій ρ , що зростає в матеріалі в результаті одного циклу навантаження. Розв'язання рівняння чисельними методами було виконано за допомогою комп'ютера IBM PC. Результати обчислювань та їх зіставління з експериментальними даними подані на мал. 4. Як це і можна було очікувати, швидкість зростання густини дислокацій, що утворюються, зростає з ростом амплітуди прикладеної напруги τ_m . Експериментальні значення ρ задовільно збігаються з розрахунковими кривими. Видно, що величина роботи виходу зменшується з ростом густини дислокацій або, що теж саме, із зростанням числа точок виходу деформуючих дислокацій на поверхню металу. Криві $\Delta\phi(N)$ та $\rho(N)$ являють собою нібито зеркальне відображення одна однієї.

На основі одержаних даних обговорюється процес розвитку втомиленості. Найбільш ймовірним здається механізм зародження на поверхні ступенів, екструзій та інтрузій, що був запропонований Коттрелом і Халлоном. В свою чергу спадання роботи виходу прямо пропорційно густині ступенів та їх дипольному моменту.

ВИСНОВКИ

1. Виготовлено та відлагоджено оригінальну експериментальну установку, що включала до себе п'єзоелектричний вібростенд та



Мал. 4. Вплив циклічних навантажень на роботу виходу електронів та на густину дислокацій. Титановий сплав марки ВТ3-1. 1 - експериментальні данні цієї роботи; 2 - літературні дослідні данні; а, в, с - розрахунок при $\tau = 60, 80$ та 120 МПа відповідно.

комплекс апаратури, який було призначено для вимірювань величин роботи виходу електронів ϕ безпосередньо під час випробувань металевих зразків на втопленість.

Відлагоджено методику вимірювань ϕ на різних металевих матеріалах. Запропоновано засіб визначення напружено деформаційного стану зразка, який включає до себе вплив н. поверхню, що досліджується, ультрафіолетового випромінювання перет. та під час вимірювань для поліпшення умов десорбції, що підвищил. точність вимірювань.

2. Проведено систематичні вимірювання на втопленість зразків, виконаних із алюмінія, титанового сплаву ВТЗ-1 т. спеціальних жароміцних сталей різних марок. Зроблено висновок щодо чутливості ϕ до структурних перебудов в металах, як передують втопленості.

3. Проведені вимірювання ϕ при статичному навантаженні н. вигин консолю закріплених металевих зразків. Знайдено, що упругі розтягуючі напруження приводять до росту ϕ , а упругі стискуючі напруження - до її зменшення. Досліджено вплив залишкових напружень на величину роботи виходу. Знайдено, що залишкові стискуючі напруження, які було наведено на поверхні металу завдяки зміцнюючим обробкам, приводять до зменшення ϕ , ти більш інтенсивно, чим більше були ці напруження. Це дає можливість прогнозування порівняльної ефективності зміцнюючих обробок поверхні до здійснення випробувань на втопленість.

4. Проведено випробування на розтягування зразків, які були виконано із сталей різних марок. В області пластичних деформацій знайдено зменшення величини ϕ . Дослідження розподілу ϕ в області тріщини втопленості, де також мають місце локальні пластичні

деформації, так само виявило зменшення значень роботи виходу.

5. Дослідження розподілу ϕ на початкових стадіях випробувань металевих зразків на втопленість показало, що в області зародження тріщини вже після числа циклів навантаження, яке відповідало близько 5% загальної довговічності зразків, спостерігається зменшення ϕ . Таким чином, метод вимірювання роботи виходу електронів під час випробувань металевих зразків на втопленість дає можливість прогнозування місця та часу тріщини втопленості. Встановлено доцільність дослідження кінетики розвитку процесу втопленості у металі за допомогою вимірювань ϕ .

6. Зменшення ϕ під час пластичного деформування металів, зокрема при втопленості, пояснено зростанням атомної шорсткості поверхні у результаті виходу на поверхню дислокацій, при цьому має місце підвищення рівня Фермі і, як наслідок, зменшення ϕ .

Запропоновано теоретичну модель, яка базується на зростанні густини дислокацій під час циклічного навантаження металу. Проведені теоретичні оцінки знаходяться у задовільній відповідності із даними експерименту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО У РОБОТАХ

1. Левитин В.В., Лоскутов С.В., Правда М.И. Исследование усталости некоторых сплавов для ГТД методом контактной разности потенциалов // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий / Тез. докл. 5-ой науч.-тех. конф. 23-28 сент., 1992г. - Запорожье. - 1992. - с. 35-36.

2. Левитин В.В., Лоскутов С.В., Правда М.И. Метод измерения работы выхода электронов в процессе испытаний на усталость //

Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения / Тез. докл. науч.-тех. конф. Киев, 28-30 окт. 1992г. - Киев. - 1992. - с. 25-26.

3. Левитин В.В., Правда М.И., Лоскутов С.В. О работе выхода электронов в процессе испытаний на усталость // Физика металлов и металловедение. - Т. 78. - Вып. 2. - 1994. - с. 180-182.

4. Levitin V.V., Loskutov S.V., Pravda M.I. and Serpetzky B.A. Influence of cyclic stresses upon the electronic work function for the metal surface // Solid State Communications. - 1994. - Vol. 92. - N 12. - p. 973-978.

5. Левітін В.В., Правда М.І., Лоскутов С.В. Прогнозування розвитку втоми в металевих матеріалах вимірювання роботи виходу електронів // Металознавство та обробка металів. - N 2. - 1995. - с. 37-40.

6. Правда М.И., Лоскутов С.В., Левитин В.В. Прогнозирование усталостного разрушения в сплавах для ГТД методом измерения работы выхода электронов // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий / Тез. докл. 6-ой науч.-тех. конф. 27-29 сент., 1995г. - Запорожье. - 1995. - с. 56.

7. Лоскутов С.В., Левитин В.В., Погосов В.В., Правда М.И. Изменение работы выхода электронов под влиянием деформирования металла // Физика металлов и металловедение. - Т. 79. - Вып. 5. - 1995. - с. 3-7.

8. Левітін В.В., Лоскутов С.В., Правда М.І., Серпецький Б.А. Способ визначення напружено-деформаційного стану зразка. Заявка на видачу патенту на винахід. Реєстр. N 93101309, 16.12.92, В 2В00617/Г/ 206. МКВ 5:G 01В 7/16.

АННОТАЦИЯ

ПРАВДА М. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 - физика металлов, Запорожский государственный университет, Запорожье, 1996.

Диссертация содержит исследование явления усталости металлов и сплавов посредством измерений одной из основных физических характеристик поверхности - работы выхода электронов ϕ в комплексе с рентгенодифрактометрическими измерениями макроскопических остаточных напряжений, а также с исследованием эволюции дислокационных структур при усталости методом дифракционной электронной микроскопии. В работе показана чувствительность величины ϕ к структурным перестройкам кристаллической решетки, имеющим место при усталости. Экспериментально доказано, что в области зарождения усталостного разрушения на ранних стадиях испытаний появляется минимум ϕ ; это даёт возможность прогнозирования времени и места образования усталостной трещины. Обнаружена корреляция между пределом выносливости материала σ_{-1} и ϕ , а также между плотностью дислокаций ρ и величиной работы выхода: рост ρ в процессе циклического нагружения при амплитудах, близких к пределу выносливости материала, приводит к уменьшению ϕ . Последнее, в свою очередь, связано с увеличением степени атомарной шероховатости поверхности в результате множественных актов элементарного скольжения при выходе на последнюю дислокаций и появлением ступенек.

ABSTRACT

ПРАВДА М.І. THE FATIGUE FENOMENA INVESTIGATION BY MEANS OF
THE WORK FUNCTION MEASUREMENTS.

The thesis on the candidat degree competition of physical-mathematical sciences on a spetiality 01.04.13 - physics of metals, Zaporozhye State Univirsity, Zaporozhye, 1996.

The manuscript of thesis contains the metals and alloy fatigue investigation by means of the work function (ϕ) determination. It is shown the sensibility of ϕ to the structural changes of the cristal lattice that takes place during fatigue tests. The appearance of minimum ϕ on the early stages of metal examples testing is experimentally proved. It gives the possibility to prognose the time and place of the fatigue crack formation. The correlation between the dislocation density (ρ) and the work function value is found: the growth of ρ during the cyclic loading with amplitudes that are close to the limit of hardness, leads to decrease of ϕ . In its turn it is caused by the growth of the atomic rough of surface as the result of the plural acts of elementary sliding by going out of the dislocations on the surface.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МЕТАЛ, ВТОМЛЕНІСТЬ, ВИПРОБУВАННЯ, ЕЛЕКТРОН, РОБОТА ВИХОДУ, ВИМІРЮВАННЯ, ПРОГНОЗ, ДИСЛОКАЦІЯ, СХОДИНКА.

A. Pravyda

438564

Ab 32.431

AB 35.437