

Опір втомі металевих конструкційних матеріалів та його взаємозв'язок зі змінами стану тонких поверхневих шарів

А.Д. Погребняк¹ • В.В. Касперська¹

Received: 7 July 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. У роботі розглядається встановлений чіткий взаємозв'язок опору втомі ряду конструкційних матеріалів і процесів, що відбуваються в їх тонких поверхневих шарах. Дослідження втомі зразків проводилися в широкому діапазоні зміни температур і амплітуд циклічних напружень в умовах одновісного розтягу-стиску з одночасним виміром товщини зміцненого поверхневого шару методом мікротвердості. На основі експериментальних досліджень втомі металевих конструкційних матеріалів, використовуючи при цьому метод мікротвердості, встановлено закономірності зміцнення (знеміцнення) їх поверхневого шару в залежності від рівня амплітуди багатоциклового навантаження і температури. Розроблено і апробовано методику прискореного визначення межі втомі конструкційних матеріалів на підставі визначення мікротвердості під час циклічного навантаження. Встановлено залежність формованої зміцненої плівки поверхневого шару від рівня пластичності матеріалу – чим більше його пластичність, тим товще зміцнена плівка, що утворюється. Зі збільшенням амплітуди циклічного навантаження товщина зміцненого поверхневого шару зменшується.

Ключові слова: багатоциклове навантаження; характеристики втомі; мікротвердість; поверхневий шар; бар'єрний шар.

Вступ

Аналіз умов роботи багатьох відповідальних елементів машинобудівних конструкцій свідчить про те, що в процесі експлуатації вони нерідко піддаються складному комплексу силових впливів, для якого характерно спільне сполучення статичних і циклічних або різнорідних циклічних навантажень. Як приклад, можна вказати на такі конструктивні елементи як фрагменти планера літального апарата, лопатки, диски газових турбін, осі коліс транспортних засобів, вали двигунів, клапанні пружини та інше. Умови їхньої експлуатації нерідко супроводжуються впливом високих температур, агресивних середовищ. Це приводить до передчасного вичерпання несучої здатності таких елементів конструкцій і до їхнього руйнування в результаті роз-

витку процесів втомі матеріалу. У зв'язку із цим дослідження опору втомі завжди представляли великий науковий і практичний інтерес [1–4 та ін.].

До теперішнього часу в цій області накопичений великий експериментальний матеріал, узагальнений у ряді фундаментальних монографій [1–6]. Проте, багато питань у проблемі втомі матеріалів залишаються недостатньо дослідженими й вимагають додаткових пророблень.

Пильна увага до проблеми втомі конструкційних матеріалів нині пов'язана, з одного боку, з інтенсивним розвитком багатьох галузей сучасної техніки, розробкою й впровадженням нових класів матеріалів, з іншого боку – із необхідністю розширення їхніх досліджень, подальших узагальнень одержуваних результатів випробувань і вдосконалюванням існуючих методів розрахунку на міцність елементів конструкцій. Така важлива характеристика, як межа втомі, що віддзеркалює здатність опору матеріалу впливу циклічних навантажень, визначається за результатами тривалих і трудомістких експериментальних досліджень і ставиться до числа характеристик, широко використовуваних у розрахунковій практиці при створенні різних машинобудівних конструкцій.

✉ А. Д. Погребняк
zhuk@inntech.kiev.ua

¹ Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
Київ, Україна

На жаль, проблема втоми конструкційних матеріалів виявилася вагомо складною, супроводжувальною розвитком у них різноманітних процесів при циклічному навантаженні й великою їхньою чутливістю до прояву різного роду факторів – технологічних, експлуатаційних, конструктивних. Незважаючи на постійне до неї уваги багатьох дослідників, сьогодні усе ще відсутні в цій області серйозні фундаментальні теоретичні роботи.

Стан проблеми. Постановка задачі дослідження

Загальновідомо, що опір втоми конструкційних матеріалів істотно залежить від стану поверхні досліджуваних об'єктів. У цьому напрямку також накопичений досить великий експериментальний матеріал, що встановлює ступінь залежності циклічної довговічності від таких факторів, як концентрація напружень, захисні покриття, прояви технологічних операцій обробки поверхні [6–8 та ін.]. Проте, багато аспектів опору втоми вимагають подальших досліджень. Зокрема, залишається недостатньо дослідженою роль тонких поверхневих шарів у формуванні опору циклічному навантаженню, у вичерпанні несучої здатності конструктивних елементів і в їхньому руйнуванні внаслідок втоми.

У наш час прийнято вважати, що пошкодження внаслідок втоми починає свій розвиток на поверхні або поблизу її. Експериментальним підтвердженням цьому є істотне підвищення довговічності металевих матеріалів при видаленні тонкого поверхневого шару товщиною до 0,1 мм хімічним поліруванням. Численні результати досліджень ранніх стадій руйнування внаслідок втоми свідчать про те, що його можна уникнути, якщо виключити порушення поверхневого шару при циклічному навантаженні шляхом, наприклад, нанесення пружних плівок, пов'язаних з основним металом [6–8].

Встановлені експериментальні закономірності стану поверхневих шарів у результаті їхньої обробки визначили методи підвищення опору втоми й довговічності конструкційних матеріалів [6, 9, 10 та інші].

Численні дослідження дозволили встановити закономірності розвитку процесу втоми, зокрема на початковій стадії. Нажаль, більшість результатів носять в основному якісний характер.

Роль поверхні в умовах пластичної деформації матеріалів давно привертає увагу вчених. Рентгеновські дослідження, виконані в 40–60 роках минулого сторіччя, показали розходження в деформуванні поверхневих і внутрішніх шарів. Н. Н. Давіденков [11] на основі результатів вітчизняних і закордонних учених висунув гіпотезу про першочергове деформування поверхневих зерен полікристалічних матеріалів на початковій стадії деформування в порівнянні із внутрішніми об'ємами. Згодом ця гіпотеза одержала експеримента-

льне підтвердження в рентген-дифракційних, електронно-графічних, поляризаційно-оптичних, металографічних дослідженнях [12]. Автор детально досліджує результати численних робіт у цьому напрямку, приділяючи більше увагу особливостям поведінки поверхневих шарів при статичному навантаженні. Велику увагу особливостям еволюції дислокаційної структури, у тому числі поверхневих шарів, у процесі втоми металів і сплавів приділено в роботі [13]. Доводиться при цьому враховувати інші стани поверхневого шару, у порівнянні із внутрішніми шарами, у зв'язку з недосконалістю його структури. Саме ця обставина пояснює першочергове деформування поверхневого шару в порівнянні із внутрішніми шарами, а це у свою чергу приводить до його зміцнення на початковій стадії деформування. Товщина зміцненого шару, що утворюється, залежить від матеріалу й коливається в діапазоні 50–200 мкм.

В. С. Івановою зі співробітниками [14], використовуючи результати власних і численних закордонних досліджень, виконаний детальний і всебічний аналіз особливостей поведінки поверхневого шару конструкційних матеріалів при різних умовах навантаження.

Встановлено, що поверхневий шар впливає на поведінку матеріалу під навантаженням. Стосовно до циклічного навантаження В. С. Івановою і В. Ф. Терентьевим запропонована модель межі втоми, відповідно до якої фізична межа втоми в металах і сплавах обумовлена саме утворенням на початкових стадіях навантаження циклічними напруженнями зміцненого поверхневого шару товщиною порядку розміру зерна. При напруженнях, що відповідають межі втоми, утворення тріщин внаслідок втоми критичної довжини в поверхневому шарі не відбувається.

Як правило, багато робіт у цьому напрямку носили в основному якісний, а не кількісний характер. До числа робіт, пов'язаних з одержанням кількісної інформації з особливостей пластичної течії поверхневих і внутрішніх шарів матеріалів, належить багато робіт Крамера [15 та інші], що висунув припущення про утворення в поверхневому шарі області з підвищеною щільністю дислокацій (debris – шар), що блокує вихід дислокацій, які генеруються внутрішніми об'ємами в процесі їхнього деформування. При цьому утворення такого шару не залежить від наявності окисної плівки й характерно для металів з різним типом кристалічних решіток. Розробка теорії дислокацій стосовно до циклічного навантаження дозволила пояснити багато явищ. Однак і вона не привела до розробки кількісних залежностей.

Вплив поверхневого шару на експлуатаційні, у тому числі втомні, характеристики деталей машин проявляється через вплив ряду факторів – геометричних, структурних, експлуатаційних. І саме через них виявляється можливим управляти властивостями матеріалу деталі, у тому числі виробу в цілому, з метою підвищення його опору зовнішньому силовому, температурному, радіаційному й іншому впливам і в остаточному підсумку несучої здатності та довговічності.

Отримані в результаті численних досліджень залежності взаємозв'язку стану поверхневих шарів і опору утомі вимагають подальших розробок у зв'язку з тим, що інформація, одержувана в процесі циклічного навантаження в широкому діапазоні температур, як правило, носить у більшості випадків обмежений характер. Вона характеризує в основному довговічність досліджуваних матеріалів, у тому числі іноді й момент зародження тріщини внаслідок втоми, структурні перетворення в матеріалі, зміни електроопір або інших властивостей матеріалів.

Температура, як правило, приводить до істотних обмежень на застосування розроблених для досліджень при кімнатній температурі методів вивчення фізико-механічних властивостей, у тому числі властивостей поверхні досліджуваних матеріалів, у процесі втоми.

У той же час розробка таких методів стосовно до високотемпературного циклічного навантаження дозволила б досліджувати зміну властивостей матеріалів безпосередньо в процесі навантаження в цих умовах, що сприяло б розкриттю проблеми високотемпературної втоми. Насамперед це ставиться до розробки методів оцінки властивостей поверхні. Саме кінетика процесу її деформування у визначальному ступені визначає працездатність матеріалу конструкції в цілому.

Особливий інтерес природно представляє подальше нагромадження кількісної інформації про розвиток пластичного деформування поверхневих і внутрішніх шарів. Із цією метою одержав досить широке використання в експериментальній практиці метод мікротвердості, що добре відображує закономірності руйнування металів внаслідок втоми. Зокрема закономірності мікропластичного деформування в локальних зонах структури металів, обумовлені рухом дислокацій. Даний метод неодноразово застосовувався багатьма дослідниками для вивчення поверхневого шару різних металів при циклічному навантаженні в умовах кімнатної температури. На жаль, опис поверхні досліджуваних об'єктів при високих температурах виключає можливість його використання без додаткових доробок. Автори [16] використовували цей метод при оцінці втомного ушкодження середньо-вуглецевої сталі й чавуну, фіксуючи зміцнення на початковій стадії навантаження й наступного розпушення, обумовленого вимірюваною мікротвердістю. Ними висловлене припущення про можливість прискореного визначення межі втоми матеріалів, ґрунтуючись на закономірностях зміни мікротвердості залежно від рівня напруження.

Виходячи з вищевикладеного, у роботі поставлена задача оцінити особливості поведінки поверхневого шару в процесі циклічного навантаження, використовуючи вимір його мікротвердості, і встановити його взаємозв'язок з опором втомі конструкційних матеріалів у широкому діапазоні температур і амплітуд циклічних напружень.

Дослідження мікротвердості матеріалів при циклічному навантаженні

У роботі представлений досить великий об'єм експериментальних досліджень поверхні зразків матеріалів з використанням методу мікротвердості в процесі циклічного навантаження як при нормальній, так і при підвищених температурах. Рівень мікротвердості визначався по залежності:

$$H_{\mu} = \frac{CP}{d^2}, \quad (1)$$

де C – коефіцієнт, що залежить від форми індентора; d – діагональ відбитка; P – зусилля навантаження.

Дослідження проводилися на модернізованій установці МИР-СТ [17, 18], оснащеної вакуумною камерою й мікротвердоміром, що дозволяє вимірювати мікротвердість поверхневого шару досліджуваних об'єктів у широкому діапазоні температур при навантаженні розтягом-стиском. Оптико-механічна частина установки побудована на базі високотемпературного металографічного мікроскопа МВТ-71, що дозволяє підвищити точність нанесення відбитка і його наступного виміру, а також забезпечує більш високу якість роботи фото- і кінознімальної апаратури.

Для можливості виміру мікротвердості й спостереження за структурою поверхневого шару циліндричного зразка його робочу частину виконували у вигляді усіченого двома паралельними площинами циліндра. З метою виміру мікротвердості й визначення товщини зміцненого поверхневого шару розроблена спеціальна методика. У ході досліджень отриманий досить великий об'єм експериментальних даних, що характеризують взаємозв'язок опору втомі та змін характеристик тонкого поверхневого шару – його мікротвердості й товщини.

У рамках даної роботи на першому етапі виконані дослідження опору багатоциклової втомі ряду конструкційних сталей і жароміцних нікелевих сплавів у широкому діапазоні температур в умовах багатоциклового розтягу-стиску з одночасним виміром мікротвердості поверхневого шару при навантаженні 1 Н.

На рис. 1, як приклад, показані характерні криві зміни відносної мікротвердості поверхні зразків сплавів ЭИ698ВД (а) і ЭИ867 (б) залежно від числа циклів навантаження до руйнування n . По осі ординат відкладена величина відносної мікротвердості:

$$\eta = \frac{(H_{\mu})_n - (H_{\mu})_0}{(H_{\mu})_0} 100\%, \quad (2)$$

де $(H_{\mu})_0$ й $(H_{\mu})_n$ – мікротвердість матеріалу у вихідному стані й після n циклів навантаження відповідно.

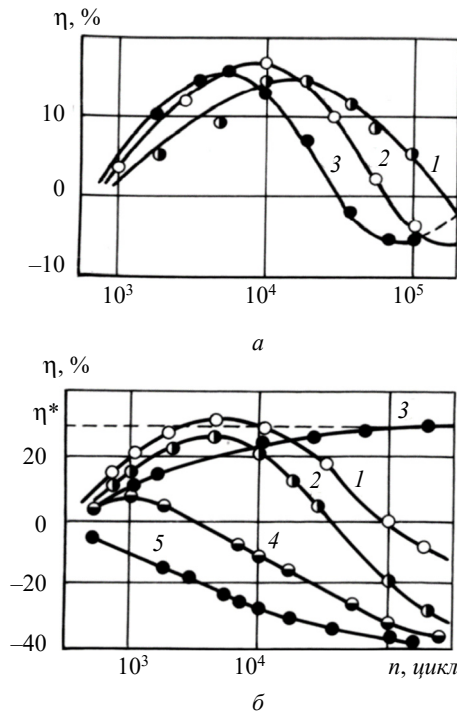


Рис. 1. Криві зміни відносної мікротвердості поверхні зразків сплавів ЭИ698ВД (а) і ЭИ867 (б) залежно від числа циклів навантаження до руйнування

Очевидно, що зміна відносної мікротвердості η відбиває процеси зміцнення або знеміцнення в ході циклічного навантаження. Як виходить із представлених даних (рис. 1, а) на початковому етапі циклічного навантаження, що відповідає інкубаційному періоду, при кімнатній температурі й руйнівних напруженнях $\sigma_a = 300$ (1), 320 (2) і 350 (3) МПа помітно значне зміцнення поверхневого шару сплаву ЭИ698ВД, що досягає 15% і більше. При цьому “насичення” зміцнення досягається за період, рівний приблизно 1% від загальної довговічності випробуваного зразка й відповідає приблизно одному і тому самому рівню незалежно від амплітуди напруження. Подальше збільшення числа циклів навантаження приводить до знеміцнення матеріалу у зв’язку з накопиченням поверхневих дефектів, слідом за яким безпосередньо перед руйнуванням зразка знову спостерігається незначне підвищення мікротвердості поверхневого шару в локальних об’ємах, близьких до зони руйнування внаслідок мікро-пластичного їхнього деформування. Ці закономірності, характерні для руйнівних напружень в діапазоні невеликих температур (до 0,55–0,60 температури плавлення) при дослідженні конструкційних і жароміцних матеріалів, ідентичні відзначеним у ряді робіт стосовно, наприклад, до легких сплавів.

З ростом діючого в зразку напруження максимум циклічного зміцнення зміщається в область менших довговічностей, причому рівень зміцнення, як встанов-

лено, практично не залежить від величини напруження (рис. 1, крива 3).

Така особливість зміни мікротвердості поверхневого шару характерна, як свідчать дослідження стосовно до сплаву ЭИ867, для температур, що не перевищують 0,6 від температури плавлення (рис. 1, б, крива 1 при $\theta = 600$ °C і $\sigma_a = 280$ МПа; крива 2 при $\theta = 700$ °C і $\sigma_a = 340$ МПа). При більш високих температурах криві $\eta = f(n)$ перетерплюють принципові зміни: ступінь зміцнення на початкових стадіях навантаження з підвищенням температури зменшується (рис. 1, б, крива 4 при $\theta = 800$ °C і $\sigma_a = 310$ МПа), а при подальшому підвищенні температури взагалі відсутній (рис. 1, б, крива 5 при $\theta = 900$ °C і $\sigma_a = 300$ МПа). Зі збільшенням тривалості випробувань відбувається монотонне зниження мікротвердості, що свідчить про знеміцнення поверхневого шару.

Як свідчать дослідження, у випадку дії напружень, менших або рівних межі втоми матеріалу (рис. 1, б, крива 3 при $\theta = 700$ °C і $\sigma_a = 320$ МПа), мікротвердість поверхневого шару підвищується зі збільшенням числа циклів навантаження й, досягнувши деякого рівня η^* , стабілізується, залишаючись постійною протягом усього періоду наступних випробувань. Період знеміцнення в цьому випадку відсутній. При цьому ступінь зміцнення поверхні близька до величини, що досягається при руйнівних напруженнях, тобто зміцнений шар у цьому випадку виконує бар’єрну функцію, запобігаючи руйнуванню при деякому рівні напружень і визначаючи, таким чином, характеристику матеріалу, прийняту як його межа втоми.

Таким чином, виконані дослідження продемонстрували чітку залежність мікротвердості поверхневого шару матеріалів від рівня прикладеного циклічного напруження й рівня температури.

Дослідження товщини поверхневого шару при циклічному навантаженні

Використовуючи результати виконаних досліджень, була відпрацьована методика визначення товщини зміцненого поверхневого шару і виконаний цикл його вимірів за умов циклічного навантаження в широкому діапазоні температур.

У ході досліджень встановлено, що товщина зміцненого поверхневого шару h залежить від вихідної пластичності матеріалу, обумовленої його відносним подовженням δ_5 , – чим більше його пластичність, тим більше товщина формованого зміцненого шару, як це демонструє представлені на графіку дані (рис. 2, крива 2). Досліджувалися матеріали, пластичність яких відрізнялася в досить широких межах – від 8% (сталь 40Х) до 13% (сплав ЭИ437А), 25% (сталь 20) і 42% (сталь Х18Н10Т). Разом з тим встановлено, що не-

залежно від вихідної пластичності матеріалу, його руйнування настає при деякій критичній товщині шару h_* (крива 1), що перебуває для різних матеріалів, незалежно від їхніх пластичних властивостей, приблизно на одному рівні й досягається за різне число циклів навантаження n залежно від діючого напруження – чим вище рівень напруження, тим швидше досягається значення критичної товщини h_* й тим раніше настає руйнування матеріалу.

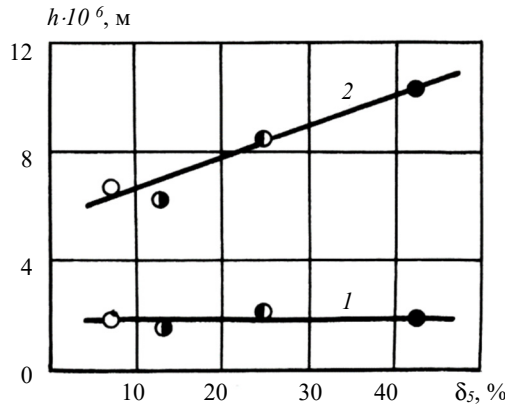


Рис. 2. Залежність товщини поверхнього шару від вихідної пластичності матеріалу: сталі 40Х (○), 20 (●), Х18Н10Т (●), сплав ЗІ437А (●)

Становлять інтерес дослідження впливу амплітуди циклічного напруження й температури випробування на кінетику зміни товщини зміцненого поверхнього шару. Загальне подання про це відображає рис. 3, побудований на підставі виконаних досліджень різних матеріалів, відповідно до якого збільшення рівня амплітуди напруження приводить до більш інтенсивного вичерпання товщини зміцненого поверхнього шару при постійній температурі, а початок руйнування матеріалу відбувається при досягненні критичної тов-

щини поверхнього шару h_* незалежно від рівня амплітуди циклічного навантаження.

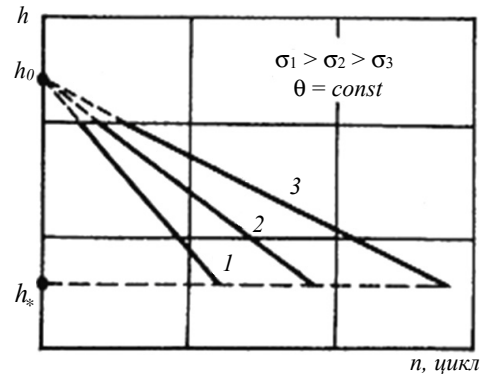


Рис. 3. Типові залежності товщини зміцненого поверхнього шару від тривалості циклічного навантаження

Виконані дослідження дозволили побудувати кінетичні залежності зміни товщини зміцненого поверхнього шару зразків (рис. 4) сталі Х18Н10Т (а), сплаву ЗІ437А (б) і сталі 20 (в) в результаті впливу циклічних напружень при кімнатній температурі. Вони свідчать про те, що з підвищенням рівня напруження інтенсивність вичерпання зміцненого поверхнього шару, що утвориться на початковій стадії навантаження, зростає, про що свідчать криві зміни товщини зміцненого поверхнього шару стосовно до сталі Х18Н10Т (рис. 4, а) і сплаву ЗІ437А (рис. 4, б) при кімнатній температурі. Аналогічні кінетичні залежності в більш широкому діапазоні амплітуд напружень, побудовані за результатами досліджень опору втомі зразків сталі 20 (рис. 4, в), що підтверджують загальні вищевказані закономірності, що характерні для циклічного навантаження конструкційних матеріалів. У цьому ж напрямку спостерігається вплив підвищення температури з 500 до 700 °С при дослідженні сталі 40Х, що демонструють криві 1–3 на рис. 5.

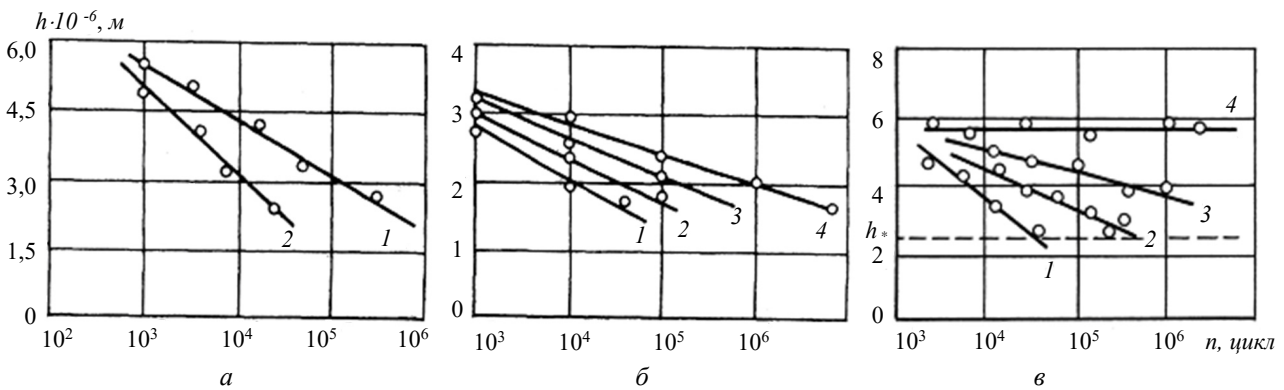


Рис. 4. Кінетичні залежності зміни товщини зміцненого поверхнього шару конструкційних матеріалів в процесі циклічного навантаження від числа циклів навантаження й величини діючого напруження: а – сталь Х18Н10Т, $\theta = 20$ °С, $\sigma_a = 146$ (1), 160 (2) МПа; б – сплав ЗІ437А, 20 °С, $\sigma_a = 370$ (1), 320 (2), 275 (3), 240 (4) МПа; в – сталь 20, 20 °С, $\sigma_a = 271$ (1), 258 (2), 246 (3), 222 (4) МПа

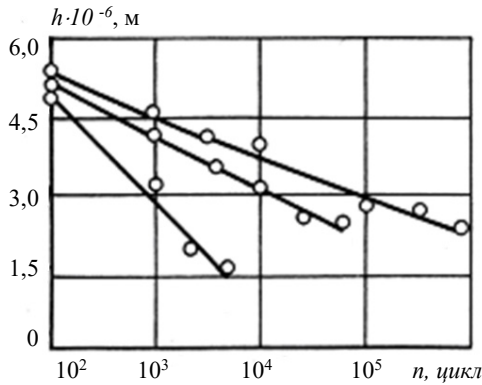


Рис. 5. Кінетичні залежності зміни товщини зміцненого поверхневого шару зразків сталі 40X від числа циклів навантаження й рівня циклічного напруження при температурах: $\theta = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma_a = 263\text{ МПа}$ (1); $\theta = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma_a = 166\text{ МПа}$ (2); $\theta = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma_a = 251\text{ МПа}$ (3)

У той же час виконані дослідження продемонстрували характерну рису поведінки товщини зміцненого поверхневого шару – вони виявили його сталість при деяких напруженнях протягом усього періоду випробувань, як це видно з наведеної ілюстрації стосовно до досліджень сталі 20 (рис. 4, в, крива 4). Саме дана амплітуда напруження σ_a , рівна 222 МПа, як виявилось, і виступає як характеристика межі втоми σ_{-1} сталі 20. Його значення, визначене з використанням стандартної методики, дорівнює 210 МПа. Отже, погрішність прискореного визначення значення межі втоми σ_{-1} виявилася рівної 5,7%. При більш високих значеннях амплітуди напружень ($\sigma_a = 246, 258$ і 271 МПа, рис. 4, в) отримані характерні залежності зміни товщини зміцненого поверхневого шару в часі, аналогічні наведеним на рис. 4 для сталі X18H10T і сплаву ЭИ437А. Таким чином, виконані дослідження виявили природу утворення такої фундаментальної характеристики як межа втоми конструкційних матеріалів при циклічному навантаженні.

Питання визначення такої характеристики, як межа втоми матеріалу завжди привертало увагу дослідників – саме ця характеристика, як вище відзначалося, використовується в розрахунковій практиці при створенні багатьох машинобудівних конструкцій.

Відома значна кількість методів прискореної оцінки межі втоми металів. Детальна їх класифікація приводиться в роботі В.Т. Трощенко із співробітниками [19]. Аналіз запропонованих методів свідчить про те, що багато з них знайшли застосування лише для конкретного класу матеріалів, інші – для конкретних умов навантаження. На жаль, точність визначення межі втоми з їхнім використанням, як правило, не дуже висока.

Представлені вище результати виконаних досліджень взаємозв'язку амплітуди циклічних напружень і товщини зміцненого поверхневого шару дозволяють

запропонувати схему прискореного визначення межі втоми конструкційних матеріалів, відповідно до якої, вибравши рівень напружень свідомо нижче межі втоми, здійснюється навантаження досліджуваного зразка матеріалу протягом певного часу й контролюється товщина зміцненого поверхневого шару. Якщо вона залишається постійною або трохи підвищується, триває випробування при періодичному збільшенні напруження доти, поки не буде виявлене зменшення товщини поверхневого шару. Попереднє цьому етапу напруження й характеризує межу втоми досліджуваного матеріалу. Результати зіставлення оцінки межі втоми ряду досліджених конструкційних матеріалів прискореним методом і з використанням стандартної методики свідчать про досить високу його ефективність, що забезпечує більшу економію й часу, і засобів при його визначенні. Наведена таблиця містить результати досліджень межі втоми жароміцних нікелевих сплавів ЭИ698ВД, ЭИ867, ЭИ437Б при підвищених температурах. В таблиці над рискою наведені результати отримання межі втоми із використанням стандартної методики, під рискою – за допомогою розробленого методу прискореного визначення межі втоми. Тут же наведена розрахована погрішність.

Таблиця. Значення межі втоми жароміцних сплавів

Сплав	$\theta = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\theta = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	σ_{-1} , МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа	δ , %
ЭИ698ВД	<u>240</u> 240	0	<u>280</u> 260	-7,1
ЭИ867	–	–	<u>260</u> 280	7,7
ЭИ437Б	<u>220</u> 240	9,1	<u>270</u> 250	7,4

Як свідчать наведені результати, погрішність визначення межі втоми запропонованим методом не перевищує 10% у порівнянні з випадком використання стандартної методики.

Певне обмеження використання запропонованого методу прискореного визначення межі втоми конструкційних матеріалів обумовлено, природно, рівнем температур, що перевищують 0,55–0,60 температури плавлення матеріалу, для яких характерний розвиток термічно активуємих процесів, що супроводжуються інтенсивними структурними змінами й тимчасовою залежністю властивостей матеріалу від температури. У цьому випадку необхідні інші підходи для визначення опору втомі, що враховують перераховані вище процеси.

Обговорення результатів досліджень

Дослідженню опору втомі конструкційних матеріалів присвячені численні роботи, з огляду на ту обставину, що саме опір циклічним навантаженням визначає багато в чому працездатність, ресурс і надійність створюваних конструкцій. А це, у свою чергу, підкреслює актуальність дослідження й визначення такої характеристики як межа втоми матеріалу, одного з основних параметрів, що визначають працездатність створюваних конструкцій і використовуваного в розрахунковій практиці. Прагнення зрозуміти природу втоми металу багато в чому визначає не тільки об'єми досліджень втоми металів, але й широкий спектр методів досліджень, використовуваних при цьому.

Багато з них частково розкрили суть процесів, що супроводжують циклічне навантаження. Безумовно, цікавим виявився взаємозв'язок опору втомі й, зокрема, існування такої характеристики як межа втоми, із процесами деформування тонких поверхневих шарів досліджуваних різноманітних металевих матеріалів.

Виконана робота продемонструвала високу ефективність використання методу мікротвердості для дослідження опору втомі й встановлення взаємозв'язку із процесами в матеріалі, що супроводжують циклічне навантаження.

Аналіз результатів багатьох виконаних експериментальних досліджень процесів у поверхневих шарах металу, підданого циклічному навантаженню, виявив досить складний їхній характер. Циклічне навантаження на початковій стадії викликає утворення на поверхні тонкого зміцненого поверхневого шару товщиною порядку одного зерна за рахунок підвищення щільності дислокацій, що знову утворюються. Залежно від рівня напружень і властивостей матеріалу відбувається поступове вичерпання зміцненого шару, про що свідчить представлена графічна інформація, після чого настає руйнування матеріалу (рис. 1). Разом з тим, при певному рівні напружень зміцнений поверхневий шар гальмує розвиток ушкодження, що, в остаточному підсумку, формує таку характеристику, як межа втоми матеріалу, що забезпечує його опір циклічним навантаженням і працездатність при більш низьких напруженнях без руйнування (рис. 1, б, крива 3).

Характер зміни ступеня зміцнення (знеміцнення) у широкому діапазоні температур і амплітуд руйнівних напружень, інваріантний щодо тривалості циклічного навантаження. З ростом діючих напружень у зразку максимум циклічного зміцнення зміщується у бік меншої довговічності (рис. 1, а, крива 3).

Ступінь граничного зміцнення матеріалів у діапазоні руйнівних напружень практично не залежить від їхньої амплітуди, тобто це свідчить про інваріантність екстремальних значень мікротвердості щодо амплітуди руйнівних напружень. Характерно, що при напруженнях, менших або рівних границі витривалості зміна відносної мікротвердості принципово інша – зі

збільшенням числа циклів мікротвердість підвищується, а досягнувши деякого рівня, стабілізується й залишається незмінною протягом наступних випробувань (рис. 1, б, крива 3). Період знеміцнення в цьому випадку відсутній.

Характер зміцнення (знеміцнення) тонкого поверхневого шару істотно залежить від температури випробування. Дослідження зміни мікротвердості при циклічному навантаженні показали, що залежності ступеня зміцнення (знеміцнення) поверхневого шару зразків, встановлені в роботі, характерні лише для області помірних температур, що не перевищують $0,6 \theta_*$, де θ_* – температура плавлення. При більш високих температурах залежність мікротвердості від числа циклів істотно змінюється; зміцнення на початкових стадіях циклічного навантаження незначне або відсутнє взагалі (рис. 1, б, криві 4, 5). У цьому випадку визначальним є процес термічного “розм'якшення” кристалічних решіток над процесами зміцнення при циклічному навантаженні.

Таким чином, виконані дослідження переконливо продемонстрували чіткий взаємозв'язок опору втомі досліджених металевих матеріалів і процесів, що відбуваються в їхніх поверхневих шарах при циклічному навантаженні. По суті, вони підтвердили опубліковану інформацію про природу формування такої характеристики як фізична межа втоми, обумовлена утворенням тонкого зміцненого поверхневого шару за рахунок виходу в поверхневий шар із внутрішніх об'ємів дислокацій, що гальмують розвиток у ньому ушкодження [14].

У роботі на основі експериментальних досліджень встановлені закономірності зміни товщини зміцненого поверхневого шару серії металевих конструкційних матеріалів залежно від рівня амплітуди циклічних напружень симетричного циклу в умовах одновісного навантаження розтягом-стиском у широкому діапазоні температур (рис. 3–5). А це, у свою чергу, дозволило сформулювати методіку прискореного визначення межі втоми матеріалів при мінімумі тимчасових витрат з високим ступенем вірогідності. Досліджувався досить широкий спектр конструкційних матеріалів – вуглецевих сталей і жароміцних нікелевих сплавів. Встановлена залежність товщини зміцненого поверхневого шару від пластичності досліджуваного матеріалу – чим більш пластичний матеріал, тим більша товщина формованого зміцненого шару, але незалежно від пластичності матеріалу, його руйнування настає при деякій критичній товщині шару h_* , яка не залежить від вихідної пластичності матеріалу (рис. 2).

Метод мікротвердості виявився саме тим методом, що забезпечив високоякісне виконання досить великого обсягу досліджень, які продемонстрували зміни стану матеріалу в тонких поверхневих шарах при його циклічному навантаженні.

Наукові дослідження, результати яких опубліковано в даній статті, виконано за рахунок коштів бюджетної програми “Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень” (КПКВК 6541230).

References

- [1] H.J. Gough, "The Fatigue of Metals", *Greenwood & Son*, 1924.
- [2] S.F. Medvedev, "Cyklicheskaya prochnost metallov", *Mashgiz*, 1961.
- [3] S. Kocanda, "Ustalostnoe rasrushenie metallov", *Metallurgia*, 1976.
- [4] P.G. Forrest, "Fatigue of Metals", *Pergamon Press Ltd*, 1962.
- [5] S.V. Serensen, V.P. Kogaev and R.M. Shneyderovich, "Nesushchaya sposobnost i raschety detalei mashin na prochnost", *Mashinostroenie*, 488 p., 1975.
- [6] V.T. Troshchenko *et al.*, *Prochnost' materialov i konstruksiy*, Institut problem prochnosti im. G.S.Pisarenko NAN Ukrainy, 2009.
- [7] S.R. Ignatovich and M.V. Karuskevich, *Monitoring vyrabotki ustalostnogo resursa letatel'nykh apparatov*, *NAUK*, 2014.
- [8] V.P. Golub and A.D. Pogrebnyak, *Vysokotemperaturnoye razrusheniye materialov pri tsiklicheskom nagruzhennii*, *Nauk. dumka*, 1994.
- [9] V.A. Shonin, "Rol' zashchitnogo pokrytiya v svarnykh soyedineniyakh alyuminiyevogo splava na soprotivleniye ustalosti", *Avtomaticheskaya svarka*, pp. 23–26, 2009.
- [10] S.R. Ignatovich and S.S. Yutskevich, "Kontrol' ustalosti splava D16AT po kharakteristikam deformatsionnogo rel'yefa poverkhnosti", *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, Vol. 47, no. 5, pp. 60–65, 2011.
- [11] N.N. Davidenkov, "Ustalost metallov", *Zhurnal technicheskoy fiziki*, Vol. 14, no. 9, pp. 507–514, 1944.
- [12] V.P. Alechin, *Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloev materialov*, *Nauka*, 1983.
- [13] T.Yu. Jakovleva, *Lokal'naya plasticheskaya deformatsiya i ustalost' metallov*, *Naukova dumka*, 2003.
V.S. Ivanova, V.F. Terentev, V.G. Poida, "Osobennosti povedeniya poverkhnostnogo sloya metallov pri razlichnykh usloviyakh nagruzheniya", *Metallofizika. Resp. mezhved. sb.*, Kyiv: *Nauk. dumka*, Vol. 43, pp. 63–82, 1972.
- [14] J.R. Kramer, *Trans. Met. Soc. AIME*, Vol. 221, no. 5, pp. 989–998, 1961.
- [15] O.Yu. Kramarenko, A.V. Kulikovskaya, "Primeneniye metoda mikrotverdosti pri otsenke ustalostnogo povrezhdeniya", *Zavod. laboratory*, no. 1, pp. 80–85, 1972.
- [16] M.E. Garf *et al.*, "Ustanovka dlya vysokotemperaturnykh ispytaniy obraztsov na ustalost' pri osevom nagruzhennii", *Prikl. mekhanika*, Vol. 10, no. 5, pp. 94–100, 1974.
- [17] A.V. Zheldubovskiy, "Ustanovka dlya issledovaniya mikrotverdosti zharoprochnykh materialov v protsesse vysokotemperaturnogo tsiklicheskogo nagruzheniya", *Probl. prochnosti*, no. 9, pp. 111–114, 1981.
- [18] V.T. Troshchenko, L.A. Khamaza and G.V. Tsybanev, "Metody uskorenno opredeleniya predelov vynoslivosti metallov na osnove deformatsionnykh i energeticheskikh kriteriyev", *Nauk. dumka*, 175 p., 1979.

Fatigue resistance of metal construction materials and its relationship with changes in the state of thin surface layers

A.D. Pogrebniak, V.V. Kasperska

Abstract. The paper considers the proven clear relationship between the fatigue resistance of a number of structural materials and the processes occurring in their thin surface layers. The fatigue studies of the samples were carried out over a wide range of temperatures and amplitudes of cyclic stresses under uniaxial tension-compression with simultaneous microhardness measurement of the thickness of the hardened surface layer. On the basis of experimental studies of the fatigue of metallic structural materials, using the microhardness method, the regularities of hardening (softening) of their surface layer are established depending on the level of the amplitude of high-cycle loading and temperature. A method for the accelerated determination of the fatigue limit of structural materials based on the determination of microhardness during cyclic loading has been developed and tested. The dependence of the formed hardened film of the surface layer on the level of plasticity of the material has been established - the greater its plasticity, the thicker the resulting hardened film. With an increase in the amplitude of cyclic loading, the thickness of the hardened surface layer decreases.

Keywords: high-cycle loading, fatigue characteristics, micro-hardness, surface layer, barrier layer.