

УДК 539.3

В.Р. Скальський, О.С. Дубицький

Луцький національний технічний університет

ЗМІНА ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ РЕСОРНОЇ СТАЛІ 50ХГ ПІД ВПЛИВОМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Описано результати випробувань на циклічну тріщиностійкість зразків з ресорної сталі 50ХГ. Їх виготовляли з не експлуатованого матеріалу ресорного листа вантажного автомобіля, а також з напрацьованого протягом певного часу експлуатації і для порівняння результатів – із відпаленого не експлуатованого матеріалу. Показано, що експлуатаційний чинник суттєво понижує нижнє порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень і пришвидшує ріст втомної тріщини.

Актуальність проблеми. Втомне руйнування відноситься до найпоширеніших видів сповільненого руйнування конструкційних матеріалів [1–8]. Воно відбувається за поступового росту найбільших початкових тріщин, аж до досягнення ними критичної величини. На початковій стадії процесу майже завжди спостерігається поступове виникнення і накопичення мікродефектів. Якщо розміри цих дефектів сумірні з характерними розмірами мікроструктури (наприклад, величиною зерна), то така стадія називається стадією зародження тріщини або інкубаційним періодом. Закінчується вона локалізацією процесу розсіяного руйнування з виникненням і розвитком макротріщини. Часто основну частину часу довговічності матеріалу займає не зародження мікротріщин, а наступний період повільного квазістатичного зростання тріщини від початкового до критичного розміру. Кінцевою стадією розвитку втомної макротріщини є повне руйнування, яке часто протікає спонтанно і якого потрібно уникати.

Розрізняють звичайне втомне руйнування за низького рівня напружень, або так звану багатоциклову втому, і руйнування за порівняно невеликої кількості циклів прикладання достатньо великих напружень, тобто випадок малоциклової втоми. В першому випадку мікропроцеси руйнування локалізуються в малій зоні біля вершини тріщини і визначаються асимптотичними полями напружень і деформацій. Відповідно, швидкість поширення тріщини повинна залежати від коефіцієнтів інтенсивності напружень. У другому випадку зона пластичних деформацій не мала, і для описання процесу поширення тріщини потрібно розглядати послідовність кроків навантаження і поширення тріщини, застосовуючи для цього нелінійну механіку руйнування.

У випадку експлуатування ресор поява мікротріщин не завжди виявляється візуально і тому наявні мікротріщини, що виникають від прикладених механічних навантажень і пітінгів, зазнають дії перерахованих вище факторів і середовища. Оцінка втомних характеристик руйнування ресорної сталі дає важливу інформацію не тільки експлуатаційникам, а й проектантам і технологам таких відповідальних силових елементів автомобіля як ресорна підвіска.

Стан проблеми. Дослідження кінетики поширення втомних макротріщин полягає у встановленні закономірностей зміни розмірів тріщини в залежності від часу або кількості циклів навантаження N [1–4]. Застосування підходів механіки руйнування до аналізу процесу втоми матеріалів на стадії поширення макротріщини призвело до ефективного методу кількісного опису та узагальнення експериментальних даних. Цей підхід полягає в тому, що прикладене до тіла навантаження, геометрія тіла та розміри макротріщини під час визначення швидкості росту втомної тріщини (ШРВТ) характеризуються одним параметром – коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) K_I , який описує поле напружень та деформацій біля вершини тріщини. Для квазікрихких матеріалів ШРВТ v залежить перш за все від КІН, як основного фактору, що контролює процес руйнування. У випадку тріщини нормального відриву цю залежність можна представити у вигляді:

$$V = F\left(K_{Imin}, K_{Imax}, C_i\right), \quad (1)$$

де K_{Imin} , K_{Imax} – відповідно мінімальне та максимальне значення КІН в циклі, C_i – константи матеріалу (характеристики циклічної тріщиностійкості). Тому прийнято представляти експериментально отримані закономірності розвитку втомних макротріщин в матеріалах у вигляді

кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР). Ці діаграми зображають залежність ШРВТ $v = \frac{\Delta l}{\Delta N}$ (для Δl довжини тріщини за ΔN циклів навантаження) від розмаху КІН за цикл $\Delta K = K_{\text{Imax}} - K_{\text{Imin}}$ або його максимального значення K_{Imax} [2]. Повна КДВР в логарифмічних координатах являє собою S-подібну криву, обмежену по осі абсцис двома вертикальними асимптотами: $K_{\text{Imin}} = K_{th}$ та $K_{\text{Imax}} = K_{fc}$ (K_{th} – порогове значення КІН, нижче якого тріщина не росте; K_{fc} – його критичне значення (циклічна тріщиностійкість), за якого відбувається остаточне руйнування зразка чи елемента конструкції). Параметри K_{th} і K_{fc} є втомними характеристиками матеріалу, які знаходять з експерименту.

На КДВР розрізняють три характерні ділянки: низько амплітудну (I), середньо амплітудну (II) та високо амплітудну (III). Такий поділ є обґрунтований не лише геометричними ознаками, а й відмінністю механізмів росту тріщини, що відображається в мікрорельєфі злому. Це в свою чергу спричиняє специфічну для різних ділянок реакцію на дію різноманітних механічних, металургійних, фізико-хімічних та геометричних факторів. Всі вони притаманні втомному руйнуванню ресорної сталі.

У літературі відомі методичні підходи [10–12] щодо розрахунку ресурсу і показників надійності ресор під час їх проектування: методики розрахунку на зношування, міцність та втому. Так у праці [12] виділено три етапи розвитку методів розрахунку на міцність і втому: перший – за допустимими напруженнями; другий – розрахунки за коефіцієнтами запасу, коли навантаження задають у вигляді функцій розподілу, а результатами розрахунків є коефіцієнти запасу міцності, витривалості, розрахунковий час роботи, а також максимальні напруження; третій – розрахунок за граничним станом з використанням варіації функцій розподілу навантаження та представленням результатів у вигляді функцій розподілу ресурсу [13]. У цих розрахунках широко використовують апарат теорії ймовірностей, який дозволяє оцінити безвідмовність деталі та може успішно застосовуватись під час розрахунків так званої схемної надійності. Він так само, як і за детерміністичного підходу, не дозволяє отримати оцінки залишкової довговічності.

Відомі розрахунки на втомну довговічність шасі автомобіля побудовані на гіпотезі сумування (накопичення) втомних пошкоджень [10, 14, 15]. Вона дозволяє за кривими втоми, які одержані під час лабораторних випробувань, судити про терміни їх функціонування у відповідних умовах експлуатування, що представлені у розрахунках схематизованими навантажувальними режимами [16–21]. Всі вони мають приблизно такий алгоритм реалізації: визначення і схематизування параметрів навантажувального режиму; визначення параметрів кривої втоми; вибір варіантів розрахунку. Щодо третього блоку алгоритму, то необхідно відзначити, що для розрахунку середнього ресурсу використовують різні методи: числові, аналітичні, з використанням табульованих функцій тощо [10]. У працях [22–24] розроблена методика оцінки деталей шасі автомобіля за допомогою кореляційних рівнянь довговічності. Вони відображають взаємозв'язок між вибраними критеріями навантажувального режиму та даними про ресурс деталей, які отримані у результаті спостереження за експлуатуванням підконтрольних груп автомобілів.

У працях [25, 26] вивчали втомну тріщиностійкість ресорної сталі 65Г у різних варіантах її термооброблення. Щодо впливу на цей показник часу експлуатації автомобіля у виробничих умовах, то таких даних у літературних джерелах не виявлено.

Мета досліджень – встановити експериментально вплив на характеристики втомного руйнування ресорної сталі часу експлуатування автомобіля у виробничих умовах за наявності у листах втомних тріщин.

Методика випробувань. З ресорних листів виготовляли 3 групи зразків: з матеріалу у вихідному (не напрацьованому) стані, напрацьованому у ресорній підвісці автомобіля ГАЗ-53А та відпаленому. Їх виготовляли призматичними з крайовою тріщиною для випробувань на згин згідно з рекомендаціями стандарту [27]. Кінцево перед випробуваннями зразки мали розміри $8 \times 20 \times 120 \text{ мм}^3$.

У лабораторній практиці досліджень тріщиностійкості матеріалів відомо три методи навантаження зразків, для отримання втомних тріщин: 1) випробування за постійного навантаження P , коли розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK , що є функцією прикладеного навантаження, геометрії зразка та довжини тріщини, монотонно збільшується; 2) випробування за постійного коефіцієнта інтенсивності напружень ($\Delta K = \text{const}$), що досягають вибором геометрії зразка або зміною напружень, які прикладають до нього; 3) випробування за

постійної деформації, коли коефіцієнт інтенсивності напружень монотонно змінюється з ростом тріщини [28].

У експериментах для виведення втомної тріщини та проведення досліджень на втомну тріщиностійкість використовували установку третього типу (рис. 1) (випробування за постійної деформації, коли коефіцієнт інтенсивності напружень монотонно змінюється з ростом тріщини) [29].

За конструкційним принципом її установка нагадує силову схему машин типу Шенк-Ерлінгер [28]. Вона працює за схемою консольного згину. Зразок 6 із конструкційного матеріалу одним кінцем жорстко фіксують в опорі 7, а іншим – у привідному важелі 4, 5, який тягою 3 з'єднаний з ексцентриком 2 двигуна 1. Важіль може повертатися навколо осі своєї фіксації під час циклічного навантаження зразка на шарнірних опорах. Вузли та блок управління випробувальною установкою змонтовані на одній основі і дають можливість вимірювати частоту циклів навантаження та його величину, кількість циклів за період випробувань або за заданий оператором відтинок часу. Величина переміщень важеля задається оператором перед початком випробувань. Важіль має можливість через вилку здійснювати коливання разом із затиснутим у ньому кінцем балкового зразка. Коливний рух важелю із необхідною амплітудою передається з ексцентрикового механізму, який приводиться в обертання електродвигуном. Зміна зусилля навантаження здійснюється зміною ексцентриситету ексцентрика.

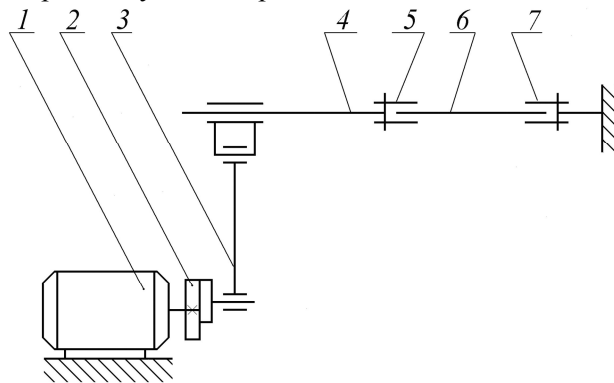


Рис. 1. Кінематична схема установки (а) та її загальний вигляд (б) 1 – електродвигун; 2 – ексцентрик; 3 – шатун; 4 – важіль; 5 – рухомий захоп; 6 – зразок; 7 – нерухомий захоп

На всіх зразках для випробувань штучну втомну тріщину створювали циклічним навантаженням, використовуючи описану вище установку. З цією метою задавали значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{fmax} , виходячи із умови $K_{fmax} \leq 0,75K_{IC}$. Кінцевий відтинок тріщини, що становить 0,3 її довжини, створювали за умови $K_{fmax} \leq 0,6K_{IC}$. Здебільшого трапляється так, що значення K_{IC} невідоме. Тоді правильність виведення втомної тріщини коректують після зруйнування дослідного примірника зразка, після чого приступають до виведення наступних втомних тріщин, ураховуючи сказане вище. Щодо цього можна також додатково користуватись залежністю $\sigma_{CO} \leq 0,5\sigma_0$, де σ_{CO} – максимальне напруження на кінцевому етапі виведення втомної тріщини. У випадку, коли не вдається виміряти величину навантаження, число циклів під час створення втомної тріщини не повинно бути меншим від 5×10^4 .

Дотримання цих вимог дає змогу вивести втомну тріщину із гострою вершиною. З урахуванням цього нами виведено втомні тріщини на відповідній установці, оснащений електронними засобами для вимірювання зусиль та деформацій і яка забезпечувала можливість вибору необхідних швидкостей навантаження чи деформування (рис. 2).

Отже, виведення втомних тріщин на зразках досліджуваних конструкційних матеріалів ми здійснювали як строго регламентовану операцію із дотриманням вимог стандарту [27].

Крайова тріщина під час проведення випробувань розвивалася перпендикулярно до напрямку вальцювання листів. Для отримання різних структур окремі зразки з вихідного матеріалу нормалізували. Після термообробки, аналогічно як і всі решту зразків, їх шліфували по бокових гранях.

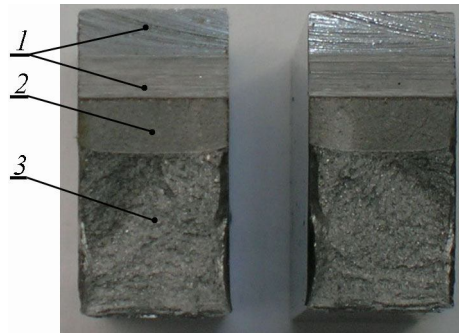


Рис. 2. Вигляд долому зразка після попередніх пробних випробувань на визначення характеристик втомної тріщиностійкості: 1 – нарізаний концентратор напружень; 2 – виведена втомна тріщина; 3 – долом

Випробування проводили за відомою методикою на повітрі, за відносної вологості 40 – 60% за майже віднульового ($R = 0,05$) синусоїдального циклу згинання з частотою 16–18 Гц. За високих швидкостей росту тріщини (більш 10^{-6} м/цикл), зважаючи на труднощі вимірювання її довжини, – також з частотою 0,017 Гц.

Кожен зразок випробовували етапами, впродовж яких підтримували постійними всі параметри циклу навантаження. При цьому на кожному етапі розмах коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ в зразках був постійним. Швидкість розвитку тріщини v на етапах з постійним ΔK обчислювали по 5–8 послідовних вимірюваннях її довжини, використовуючи метод найменших квадратів, а за зростаючого ΔK значення v визначали як відношення приросту тріщини між двома послідовними вимірюваннями до відповідного числа циклів.

Для оцінки характеристик циклічної тріщиностійкості й аналітичного опису повних діаграм втомного руйнування застосовували рівняння

$$v = v_0 (\Delta K - \Delta K_{th}^*)^q / [(1 - R)K_{fc}^* - \Delta K]^q, \quad (2)$$

а середні ділянки діаграми апроксимували рівнянням Періса, записаним у вигляді

$$v = 10^{-7} (\Delta K / \Delta K^*)^n, \text{ м/цикл.} \quad (3)$$

У цих рівняннях $\Delta K_{th}^* = (1 - R)K_{th}^*$ і K_{fc}^* – параметри, які за відомих умов можна розглядати як пороговий і критичний коефіцієнти інтенсивності напружень; ΔK^* – характеристика матеріалу, відповідна розмаху ΔK при $v = 10^{-7}$ м/цикл і пов'язана з коефіцієнтом C рівняння $v = C \Delta K^n$ співвідношенням $C = 10^{-7} (\Delta K^*)^{-n}$. Параметри рівнянь (1) і (2) обчислювали за спеціально створеною програмою. За отриманими даними досліджень побудовано діаграми втомного руйнування, які показують, що експлуатаційний чинник негативно впливає на статичну тріщиностійкість ресорної сталі.

Результати експериментів та їх тлумачення. Як відомо [11, 25], ресорна сталь 50ХГ після кінцевої термообробки має структуру сорбіту. При низьких швидкостях росту тріщини мікробудова зламу в цій структурі істотно відрізняється від мікробудови після нормалізації. Тут з'являються специфічні втомні мікрозападини з регулярними хвилястими мікроутвореннями, що нагадують борозенки. Розміри цих западин співмірні з величиною феритних прошарків сорбіту, в межах яких існують, мабуть, сприятливі умови для циклічного ковзання, що призводить до утворення мікроборіздки. Аналогічна структура зламу і у напрацьованому матеріалі, де трапляються незначні розшарування на границі зерен.

Зауважимо, що на поверхнях руйнування досліджуваних структур не виявлено в помітній кількості типового для втомного руйнування борізdkового рельєфу. Він властивий феритній структурі відпаленої сталі. Отже, для утворення борізdkового рельєфу необхідні певні умови, які реалізуються, зокрема, в сталях з не дуже великим змістом вуглецю. Тому саме з борознистим механізмом руйнування пов'язана деяка структурна нечутливість тріщиностійкості відпаленої сталі в середній ділянці діаграми втомного руйнування.

Після відпалу структура сталі 50ХГ є типовою рекристалізаційною структурою: неоднорідна суміш дрібних феритних і грубих перлітних рівновісних зерен розміром близько 30 мкм. На порядок дрібніші зерна фериту оточують перлітні зерна несучільними, перерваними ланцюжками. Проте подекуди, найчастіше в глибині листа, спостерігаються текстуровані ділянки,

в яких феритні і перлітні зерна не рівновісні. Вони витягнуті впоперек ресорного листа. Ці ділянки свідчать про наявність попередньої стрічковості структури прокату, з якого виготовлено ресорний лист. Витримка за температури аустенізації під час відпалу не усуває стрічковості [30]. Очевидно остання виникає через забруднення ресорної сталі неметалічними сульфідами, а також внаслідок ліквідації фосфору.

Під час розгляду діаграм втомного руйнування ресорної сталі з різними структурами звертає на себе увагу така основна закономірність – у міру пониження температури відпуску (відпал вважається найвищим відпуском), тобто при переході від пластичної перлітно-ферритної структури до трооститу зміщуються вліво і, отже, опір зростанню втомної тріщини зменшується, а швидкість її зростає і діаграми стають все крутішими (рис. 3).

Припорогова область КДВР для всіх трьох зразків є різною. На ній помітно суттєве зменшення КІН ΔK_{th} для напрацьованої сталі порівняно із вихідним матеріалом, а тим більше із відпаленим. Ця різниця відчутно нижча у верхній припороговій ділянці для ΔK_{th} .

Середня ділянка діаграм посувається у бік нижчих швидкостей головним чином за рахунок падіння швидкості v_{2-3} . При цьому протяжність середньої ділянки – як абсолютна $B = \Delta K_{2-3} - \Delta K_{1-2}$, так і відносна B/A – у крихких структур менша, ніж у пластичних. Все це виявляється в зниженні характеристик K_{fc} і ΔK_{th} , а також є збільшенні n .

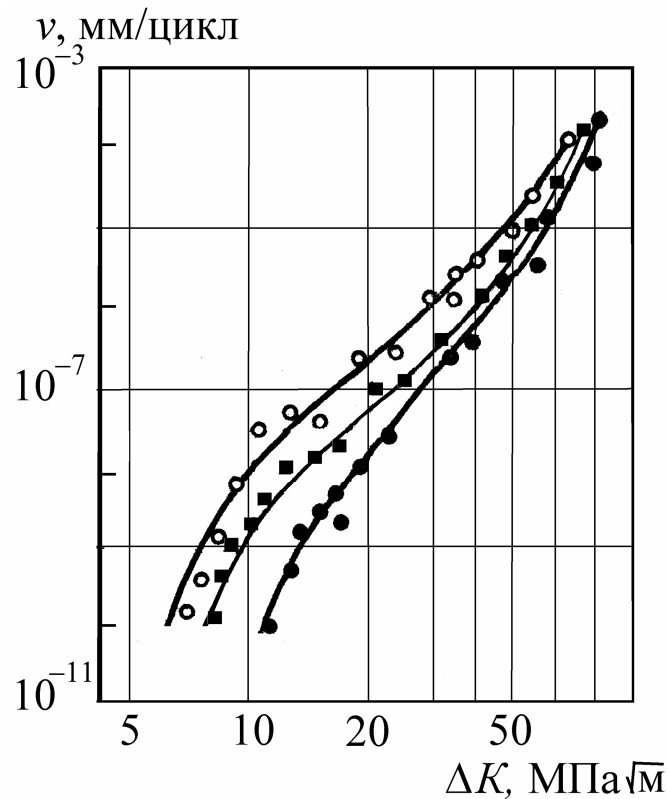


Рис. 3. Діаграми втомного руйнування сталі 55ХГ: світлі кружечки – у напрацьованому стані; темні квадрати – у стані поставки; темні кружечки – після відпалу

Отримані в наших дослідженнях характеристики ділянок діаграми втомного руйнування порівнювали зі встановленими іншими авторами результатами для близьких за тріщиностійкістю вуглецевих і помірно легованих сталей [25] при майже віднульовому ($R = 0-0,1$) циклі навантаження. Результати добре співпадають.

Висновки. Отримані в нашій роботі результати оцінки характеристик втомної тріщиностійкості ресорної сталі 55ХГ добре укладаються в загальні залежності характеристик циклічною тріщиностійкості сталей від їх структури і межі текучості.

1. Панасюк В. В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / В. В. Панасюк. – К.: Наукова думка, 1991. – С. 416.

2. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие в четырех томах. /Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988 – 1990. – С. 224.
3. Слепян Л.И. Механика трещин / Л.И. Слепян. – Л.: “Судостроение”, 1981. – С. 296.
4. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при малоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – К.: Наукова думка, 1981. – С. 343.
5. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наукова думка, 1990. – С. 680.
6. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – С. 640.
7. A critical plane gradient approach for prediction of notched HCF life / R.A. Naik, D.B. Lanning, T. Nicholas, and A.R. Kolemeier // Int. J.Fatigue. – 2005. – 27, № 5. – P. 481 – С. 492.
8. Assessment of the integrity of structures containing defects / R.P. Harrison, K. Loosemore, J. Milne, A.R. Dowling // CEGB R6, Revision 2, April 1980. – P. 193.
9. Smith K.N. A stress-strain function for the fatigue of metals / K.N. Smith, P. Watson, T.N. Topper // J. Mater. – 1970. – V. 5. – P.767 – 778.
10. Лукинский В.С. Долговечность деталей шасси автомобиля. /В.С. Лукинский, Ю.Г. Котиков, Е.И. Зайцев; под общ. ред. В.С. Лукинского. – Л.: Машиностроение, Ленингр. от-ние, 1984. – С. 231.
11. Пархиловский И.Г. Автомобильные рессоры. /И.Г. Пархиловский – М.: Машиностроение, 1978. – С. 225.
12. Аксенов Л. А. Исследование усталостной долговечности деталей рулевого привода автомобилей с учетом нестационарности нагружения. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1975. – С. 24.
13. Дубицький О.С. Модель методики розрахунку залишкового ресурсу ресори за наявності тріщиноподібного дефекту/О.С. Дубицький. – Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2012. – №2. – С. 121–129.
14. Robinson E.L. Effect of temperature variation on the long time rupture strength of steels /E.L. Robinson // Trans. ASME. – 1952. – 74, №5. – P. 68 – 76.
15. Скальський В.Р. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії/ В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – С. 330.
16. Бурдасов Е.И. Оценка долговечности автомобильных многолистных рессор по результатам ускоренных полигонных испытаний. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1971. – С. 21.
17. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. /В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 232.
18. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность /Под ред. П.М. Волкова, М.М. Тененбаума. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 310.
19. Прочность и долговечность автомобиля / Б.В. Гольд, Е.П. Оболенский, Ю.Г. Стефанович и др. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 328.
20. Ресурсные испытания грузовых автомобилей на полигоне. Ч. II /Под ред. Н.Н. Яценко. – М.: НИИНавтопром, 1974. – С. 86.
21. Серенсен С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1975. – С. 488.
22. Зайцев Е.И. Прогнозирование ресурса деталей трансмиссии и подвески грузовых автомобилей. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1980. – С. 25.
23. О прогнозировании долговечности автомобильных деталей с помощью кривых повреждаемости /В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев, Ю.Г. Котиков и др. – Автомобильная промышленность, 1977. – № 3. – С. 13–15.
24. Определение средней долговечности рессор грузовых автомобилей/ /В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев, Ю.Г. Котиков и др. – Автомобильная промышленность, 1978. – № 8. – С. 25–27.
25. Ярема С.Я. Влияние структуры на сопротивление стали 65Г росту усталостной трещины / С.Я. Ярема, В.В. Попович, Ю.В. Зима.// Физико-химическая механика материалов. – 1982. – №1. – С. 16–30.
26. Ярема С.Я. / С.Я. Ярема, Л.В. Ратич, В.В. Попович. // Физико-химическая механика материалов. – 1975. – №3. – С. 45–51.

27. РД 50-345–82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – Введ. 01.01. 83. – М.: Изд-во стандартов. – 1983. – С. 95.
28. Серенсен С.В. Машины для испытаний на усталость/ С.В. Серенсен, М.Е. Гарф, Л.А. Козлов. – М.: Машгиз, 1957. – С. 404.
29. Скальський В.Р. Установка для дослідження втомного руйнування методом акустичної емісії / В.Р. Скальський, Я.Д. Толопко, П.П. Великий та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія), вип. 14: Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 43–49.
30. Скальський В.Р. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – С. 330.