

ЛАЗЕРНО-РАДІАЦІЙНИЙ МЕТОД ЕМУЛЯЦІЇ ЗМІНИ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В.А. Леонець

LASER-RADIATION EMULATION OF THE STRUCTURAL MATERIALS FATIGUE LIMIT

V.A. Leonets

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Україна

Abstract This paper presents a method using laser and radiation technology for the emulation of degrading endurance limits of engineering materials which have been used for a long time. It is shown that endurance limits of engineering materials and products made of them can be both increased and decreased by means of laser radiation treatment, and electron stream treatment through precipitators.

It is offered to measure changes in engineering materials' endurance limits by registering changes in their strained surface layers, particularly in points where fatigue cracks have occurred. A method for registering changes in strained surface layers of engineering materials using AVK-T1 zero-indicator has been considered.

Досвід ведення робіт щодо продовження призначених показників залізничних локомотивів та електро-дизельпоїздів показує, що актуальною проблемою є підвищення точності визначення залишкового ресурсу їх рам візків, рам кузовів та несучих кузовів. Імовірність появи тріщин втомних в цих елементах конструкцій здійснюється при нерегулярному навантаженні та необмеженому ресурсі за допомогою третього розрахункового методу С.В. Серенсена [1] та методу коригування лінійної гіпотези складання втомних пошкоджень [2].

Методом коригування лінійної гіпотези складання втомних пошкоджень визначається втомна довговічність елементів несучих конструкцій шляхом розрахунку числа блоків їх навантажень λ до виникнення тріщин. Точність розрахунку λ залежить від точності визначення в статистичному аспекті максимальних напружень $\sigma_{a\max}$, які виникають в елементах конструкцій, коефіцієнта варіації блока навантажень V_δ та показників кривої втомних цих конструкцій: σ_{-ID} -границі витривалості, N_G - довговічності, m - показника нахилу частини графіка втомних зразків. Величини $\sigma_{a\max}$, V_δ ми визначаємо шляхом тензOMETричних вимірювань напружено-деформованого стану елементів конструкцій за допомогою бортових вимірювальних комплексів [3] з наступною обробкою осцилограм методом "дощу" [4]. Використання вимірювальних приладів БВК-6 дозволяє визначити блок виникаючих напружень в елементах несучих конструкцій досліджуваного парку локомотивів з заданою імовірністю отримання достовірної інформації. Експериментальне визначення величин σ_{-ID} , коефіцієнта варіації σ_{-ID} , N_G , m рам візків залізничного рухомого складу вимагає додаткових досліджень. В [5] показано, що границя витривалості рам візків пасажирських вагонів збільшується після їх експлуатації протягом початково призначеного терміну служби. В [6] показано, що границя витривалості рам візків тепловозів 2ТЭ10Л, 2ТЭ116 після відпрацьованого початково призначеного терміну служби, навпаки, зменшується. При цьому спостерігається збільшення величини m . Спостерігається також збільшення границі витривалості литих боковин візків вантажних вагонів після тривалої експлуатації. Механізм цього явища ще не вивчений як для конструктивних матеріалів, так і для їх зварних з'єднань.

В статті наведені результати зміни границі витривалості конструкційних матеріалів методом лазерно-радіаційного опромінення та запропоновано оцінювати ці зміни шляхом вимірювань деформації поверхні конструкційного матеріалу біля тріщини втоми.

Суть лазерно-радіаційної обробки конструкційних матеріалів полягає в тому, що поверхня зразка деталі чи елемента конструкції спочатку опромінюється лазерним випроміненням крізь оптично прозоре покриття. Якщо тривалість лазерного імпульсу становить наносекунди, то в прозорому покритті виникає ударна акустична хвиля, яка своєю дією зміцнює поверхневий шар мішені. Це призводить до збільшення їх границі витривалості, довговічності [7]. Якщо робочу частину зразків, виготовлених з сталі 3 чи алюмінієвого сплаву, опромінити мілісекундним лазерним світлом, то під час випробувань на втому спостерігається подвійний характер росту тріщин [8]. Спочатку в приповерхневому об'ємі матеріалу спостерігається крихке руйнування, а в глибині матеріалу - в'язке.

Для лазерного опромінення зразків, виготовлених з сталі 65Г та сплаву Д16Т, нами використана установка, яка включає в себе мілісекундний лазер ГОС-1001, працюючий в режимі вільної генерації світла [9]. Випробувались зразки, схема яких показана на рис.1,а. Зразки, виготовлені зі сплаву Д16Т, відпалювались в термічній печі при температурі 400°C на повітрі. Зразки, виготовлені зі сталі 65Г, загартовувались шляхом нагріву до 800°C з наступним охолодженням в маслі та відпалом при 600°C з охолодженням на повітрі. Таким чином були отримані зразки, виготовлені з пластичного алюмінієвого сплаву та пружинної сталі.

Зразки випробувані на установці "Шенк". Вони випробувані на консольний симетричний згин, по жорсткій схемі навантаження.

З метою опромінення зразків мілісекундним імпульсом лазерного світла з рівномірним розподілом його енергії в поперечному перетині променя, нами було нанесено на поверхні зразків полімерне покриття. Схема покриття показана на рис.2.

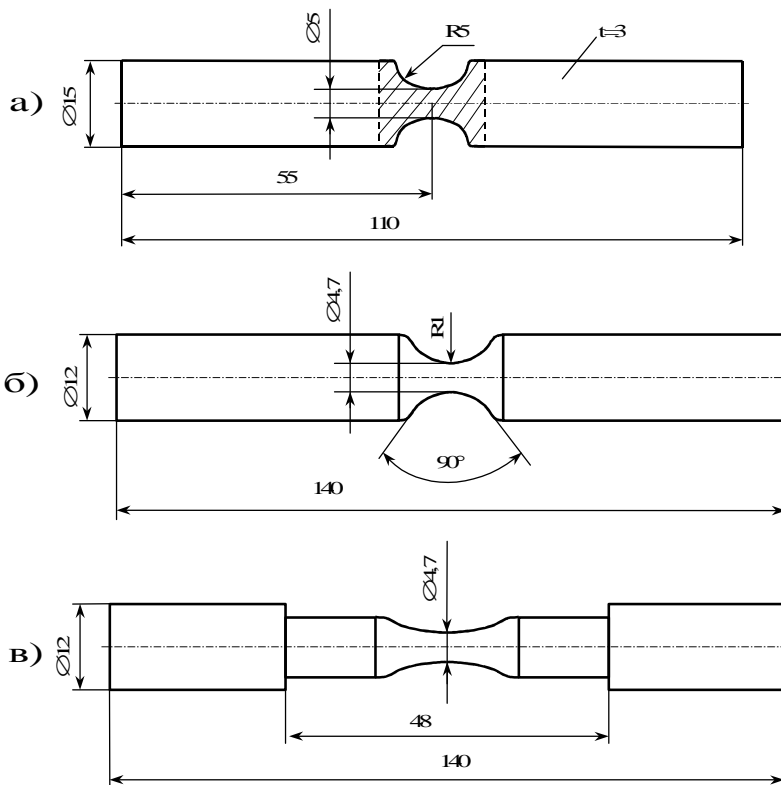


Рис.1 Схема зразків

Поверхня зразка покривалась епоксиполімерним покриттям 2 в рідкому стані. Полімер був наповнений алюмінієвим порошком. Середній статистичний розмір частинок порошку становив $0.32\ \mu\text{m}$. Використано покриття з 100% наповненням порошку. Покриття 2 полімеризувалось до твердого стану при 120°C протягом 10 хвилин. Потім наносився шар оптично прозорого епоксиполімерного покриття 3. Цей шар також полімеризувався до твердого стану при підвищеній температурі. На рис.1,а штриховими лініями показане місце нанесення покриття. Використано епоксиполімер, який складається з 100 вагових частин диглицидилового

ефіру камфорної кислоти та 43 вагових частин затверджувача УП-0633 [10].

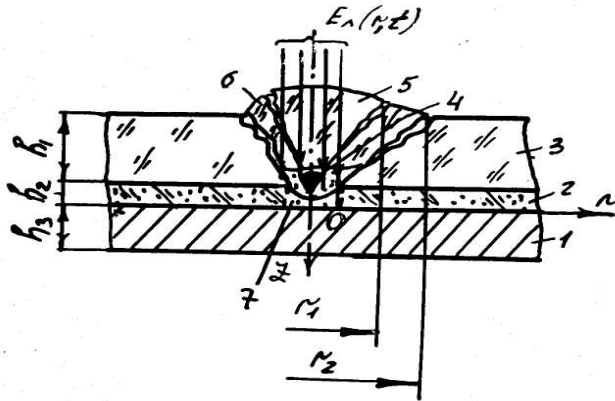


Рис.2. Схема покриття.

частинками сажі, алюмінієвим порошком приводило до виникнення ядра плазми 4. Збільшення його розмірів обумовлювало ріст тиску газу в тріщині. Спочатку руйнувалось покриття у вигляді конічного корка 5, опісля - у вигляді уламків 6 кратера. Після цього спостерігалось руйнування наповненого покриття 2. Руйнування наповненого покриття 2 відбувалось у вигляді циліндричної ямки-дна кратера 7. При цьому відбувався нагрів металевої поверхні зразка. Змінюючи товщину покриття, умови його полімеризації, а також використовуючи різні типи та розміри порошоків-наповнювачів, можливо змінювати швидкість та температуру нагріву металевої поверхні зразків 1, розподіл енергії в перетині падаючого лазерного променя. Можливо здійснювати "позарезонаторне" керування характеристиками опромінення поверхні зразка світлом, яке генерується лазером, що працює в режимі вільної генерації світла. Тривалість лазерного імпульсу становила 1 мілісекунду, а щільність енергії - $(1,65-1,45) \times 10^6$ Дж/см².

Випробувались зразки, виготовлені з сталі 40X в стані поставки прутка діаметром 20 мм та після лазерної обробки. Схема зразків показана на 1,б. Випробування здійснено на консольний згин при жорсткому симетричному навантаженні. Для обробки концентратора напружень використано описане вище полімерне покриття та одномодовий імпульсний YAG-лазер. Тривалість імпульса світла становила 40 наносекунд, щільність потужності випромінювання - $2,33 \times 10^9$ Вт/см², енергія випромінювання - 1 Дж..

Обробка матеріалів зразків на глибині 2-3 мм від поверхні здійснювалась на електронному прискорювачі потоком електронів з енергією, яку можливо вирахувати за формулою [11]:

$$E \geq K_1 (C_m \rho)^{K_2}, \quad (1)$$

де E - енергія електронів, МеВ; C_m - максимальна товщина мішені, мм; ρ - густина конструкційного матеріалу, г/см³; K_1 , K_2 - деякі константи. Інтегральна доза опромінення потоком електронів знаходилась в межах від 10^{17} до $2 \cdot 10^{18}$ см⁻². При цьому в матеріалі відбувались радіаційно стимульовані фазові перетворення, здатні вплинути на розподіл залишкових напружень в зразках, зменшити розкид значень їх втомної довговічності.

Радіаційним опроміненням були оброблені титанові корсетні зразки, виготовлені з прутка діаметром 20 мм, з сплаву ВТ8 та компресорні лопатки авіаційного двигуна, виготовлені з сплаву ВТ8. Схема титанових зразків показана на рис. 1,в. Зразки випробувані на коловий згин при м'якій формі навантаження.

Результати випробувань зразків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Довговічність зразків, виготовлених з різних конструкційних матеріалів

Матеріал	Вид обробки						Примітка
	Вихідний стан		Лазерне опромінення		Радіаційне опромінення		
	σ_a , МПа	N,цикл.	σ_a , МПа	N,цикл.	σ_a , МПа	N,цикл.	
Д16Г	112,5	6×10^3	112,5	4×10^3	-	-	
Також	112,5	-	112,5	5×10^3			
-"-	110,0	4×10^4	110,0	$3,5 \times 10^4$			
-"-	95,0	6×10^4	95,0	$3,5 \times 10^4$			
-"-	95,0	1×10^5	-	-			
-"-	90,0	$1,5 \times 10^5$	90,0	$8,5 \times 10^4$			
-"-	83,5	$4,5 \times 10^5$	83,5	2×10^5			
-"-	78,4	$4,5 \times 10^5$	78,4	$3,5 \times 10^5$			
-"-	74,0	$6,5 \times 10^5$	74,0	5×10^5			
-"-	71,4	$1,4 \times 10^6$	71,4	$8,5 \times 10^5$			
65Г	-	-	3257,0	$0,99 \times 10^5$			
Також	3257,0	$1,08 \times 10^5$	3257,0	$0,87 \times 10^5$			
-"-	2500,0	$3,0 \times 10^5$	2500,0	$3,69 \times 10^5$			
-"-	2500,0	$5,5 \times 10^5$	2500,0	$4,65 \times 10^5$			
-"-	1630,0	$4,18 \times 10^5$	1630,0	$2,5 \times 10^5$			
40Х	335,0	$2,2 \times 10^5$	335,0	$4,5 \times 10^5$			
Також	305,0	$1,2 \times 10^5$	305,0	$2,2 \times 10^5$			
-"-	-	-	305,0	$6,0 \times 10^5$			
-"-	270,0	4×10^5	270,0	$7,8 \times 10^5$			
-"-	250,0	$4,5 \times 10^5$	250,0	$3,5 \times 10^5$			
-"-	230,0	$9,0 \times 10^5$	230,0	$1,2 \times 10^6$			
-"-	-	-	222,5	$5,0 \times 10^5$			
-"-	-	-	222,5	$6,0 \times 10^5$			
-"-	220,0	$6,0 \times 10^5$	220,0	$5,0 \times 10^6$			Зразок не зруйнувався
-"-	210,0	$5,0 \times 10^6$ *	-				Зразок не зруйнувався
ВТ8	326,0	$7,0 \times 10^6$			326,0	$1,1 \times 10^5$	
Також	Також	$9,0 \times 10^6$			Також	$1,2 \times 10^5$	
-"-	-"-	$2,2 \times 10^7$			-"-	$1,4 \times 10^5$	
-"-	-"-	$4,0 \times 10^7$			-"-	$1,5 \times 10^5$	
-"-	-"-	$9,0 \times 10^7$			-"-	-	
Компрес. лопатки з ВТ8	700,0	$1,8 \times 10^6$			700,0		
Також	Також	$5,5 \times 10^6$			Також	$1,5 \times 10^6$	
-"-	-"-	$2,0 \times 10^6$			-"-	$9,0 \times 10^6$	

-“-	-“-	2.5×10^6			-“-	$4,0 \times 10^6$	
-“-	-“-	3.0×10^6			-“-	$6,0 \times 10^7$	
-“-	-“-	6.5×10^6			-“-	$6,0 \times 10^7$	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-“-	$6,0 \times 10^7$	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-	-	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-	-	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-	-	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-	-	
-“-	-“-	$2,0 \times 10^7$			-	-	

Після радіаційного опромінення титанові лопатки полірувались лазерним випроміненням.

Результати випробувань зразків, які наведені в табл.1 свідчать, що можливо змінювати в певних межах границю витривалості, довговічність, розкид їх значень різноманітних конструкційних матеріалів шляхом лазерного чи радіаційного опромінення. Зміни вищезгаданих характеристик конструкційних матеріалів залежать від фізичного стану поверхонь досліджуваних елементів конструкції. Стан цих поверхонь, на нашу думку, впливає на процеси зародження та росту в них тріщин втоми. Тому кількісно оцінити ступінь деградації конструктивних матеріалів ,зварних з'єднань можливо шляхом реєстрації зміни деформованого стану їх поверхонь в момент появи тріщини втоми, їх початкового росту.

З метою вимірювань зміни деформованого стану поверхні елемента конструкції після появи в ній та росту тріщини втоми нами розроблено прилад АВК-Т1. АВК-Т1 призначений для виявлення на початковій стадії росту тріщини втоми в елементах конструкцій залізничного транспорту в процесі їх експлуатації. Він працює в режимі нуль-індикатора. Зараз цей прилад проходить метрологічну атестацію.

Дія нуль-індикатора заснована на періодичному контролі (наприклад, під час технічного огляду) величини сигналу балансу вимірювального та компенсаційного каналів АВК-Т1 у вихідному режимі роботи (при відсутності динамічних деформацій) двох тензорезисторів тензометричного поста. Поява тріщини біля одного з тензорезисторів, збільшення її розмірів причиняє відповідну деформацію тензорезистора, що приводить до появи сигналу розбалансування на вході АВК-Т1. По величині цього розбалансування можливо судити про наявність тріщини. Подальший розвиток тріщини приводить до залишкових деформацій чи повного розриву дротяної градки тензорезистора.

Приріст сигналу розбалансування АВК визначається за формулою:

$$\Delta U_T = U_{Ti} - U_{T0}, \quad (2)$$

де U_{T0} - вихідне значення сигналу балансу АВК на момент часу встановлення тензометричного поста. U_{Ti} - значення сигналу балансу АВК на момент часу проведення контрольних вимірювань.

Встановлення факту зародження тріщини здійснюється за критерієм перебільшення абсолютної величини сигналу ΔU_T подвоєного значення абсолютної похибки дрейфа вимірювального каналу АВК, який працює в режимі тензометричного нуль-індикатора. Допустиме значення ΔU_T повинно визначатись за формулою:

$$[\Delta U_T] > \frac{2\gamma_D}{100} \cdot U_{TH}, \quad (3)$$

де $\gamma_D = 2,16\%$ - похибка дрейфа вимірювального каналу АВК в режимі роботи нуль-індикатора. $U_{TH} = 200$ мВ – нормуюче значення вихідного сигналу АВК.

Довжина тріщини на початковій стадії зародження досягає значень одиниць мікрометра, що суттєво ускладнює можливість її візуального виявлення. Тому контроль розвитку тріщини доцільно продовжувати в процесі експлуатації конструкції до появи залишкових деформацій чи руйнування тензорезистора, при яких довжина тріщини може досягти значень десятків міліметрів.

Одиночний тензометричний пост нуль-індикатора створено з двох тензорезисторів, наклеєних в межах заданої ділянки конструкції в наступному порядку розміщення пластин тензорезисторів (рис. 2):

- вимірювальні осі обох тензорезисторів орієнтовані перпендикулярно імовірному напрямку розвитку тріщини та зміщені відносно один одного на віддалі

$$F = H + \Delta H, \quad (4)$$

де H - ширина пластини тензорезистора, $\Delta H = 2-3$ мм – допуск на встановлення тензорезисторів.

- пластини тензорезисторів зміщені відносно одна одної з перекриттям по довжині їх дротяних ґраток (баз) на величину $\Delta B = 3-5$ мм.

На рис. 2 показана схема розміщення тензорезисторів здвоєного тензометричного поста, який забезпечує перекриття очікуваного місця появи тріщини розміром

$$L = 3B - 2\Delta B, \quad (5)$$

де B - розмір бази тензорезисторів, ΔB - допуск на встановлення тензорезисторів.

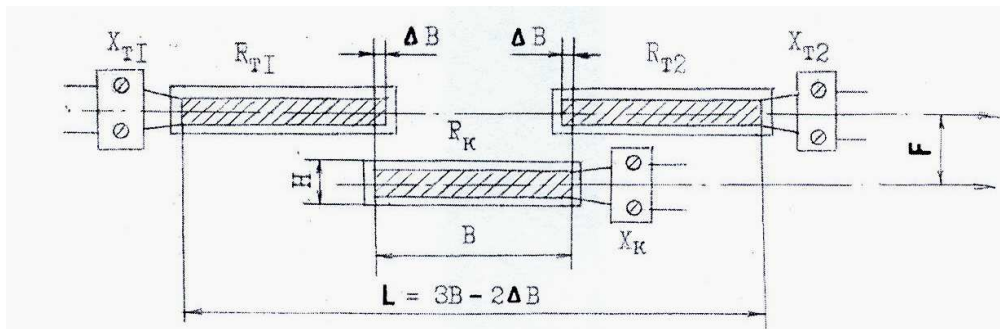


Рис. 3. Схема розміщення тензорезисторів, R_{T1} , R_{T2} - вимірювальні тензорезистори; R_K - компенсаційний тензорезистор.

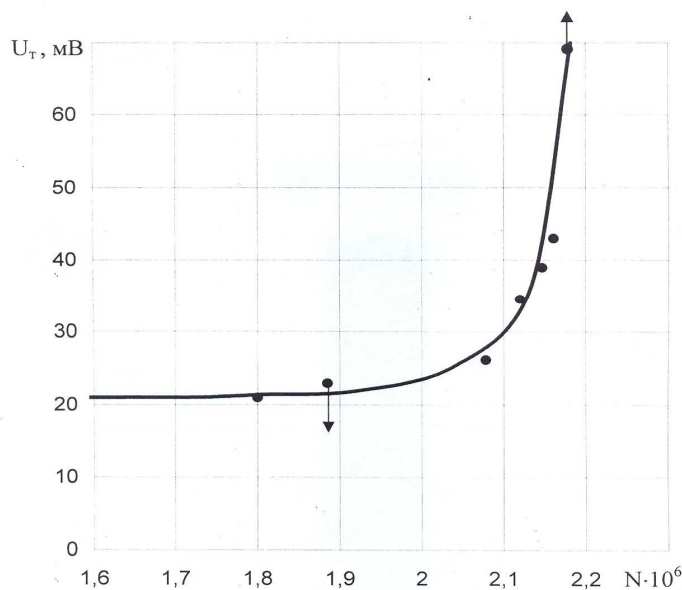


Рис. 4. Залежність напруги розбалансування U_T від числа циклів навантажень N .

На рис.4 показано залежність U_T від N в лінійних координатах для зразка, виготовленого з сталі 3 та випробованого на утснвці ДСО-2 [10]. Стрілками показані моменти появи тріщини втомі та руйнування тензорезистора.

Зміну стану вимірювального тензорезистора та його клейового з'єднання із зразком в процесі розвитку тріщини можливо представити так. На початку розвитку тріщини відбувається локальне руйнування шару клею датчика біля тріщини. При цьому локальна частина пластини тензорезистора

зистора відшаровується від зразка. Подальший розвиток тріщини приводить до розтягування відклеєної частини тензорезистора та руйнування константалової фольги дротяної градки тензорезистора, що приводить до пластичної деформації датчика. Різке збільшення деформації дротяної градки датчика може привести до руйнування датчика. Тому дія тензометричного нуль-індикатора являється ефективним до моменту повного руйнування тензорезистора.

Література

1. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Справочное пособие. М.: Машиностроение.- 1975.-488с.
2. Когаев В.П. расчеты на прочность при напряжениях, переменных по времени. М.: Машиностроение.-1977.-252с.
3. Леонец В.А., Леонец А.А., Токрев О.Д. и др. Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения//Сб докл. межд. Конф. “ Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ-70”, РФ, Щербинка.-2002.-С.180-182.
4. ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
5. Черкашин Ю.М., Северинова Т.П., Петраков С.Е. и др. Оценка остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава после длительного периода эксплуатации//Вестник ВНИИЖТ.-2000.-№7.-С.30-35.
6. Оганян Э.О., Бунин Б.Б., Шевченко В.Г. и др. Оценка долговечности и остаточного ресурса несущих конструкций экипажной части локомотивов // Вестник машиностроения.-2004.-№12.-С.23-26.
7. Леонец В.А., Бермас Т.Б. Лазерное упрочнение резьб буровых труб // Научно-практич. семинар “Применение лазеров в народном хозяйстве, науке и технике”. Тез. докл.: Челябинск: РДНТЭП, 1992.-С12-14.
8. Соленов С.В., Сиротин В.Е. Влияние лазерной обработки на развитие разрушения в стали и алюминиевых сплавах/В кн.: Механика разрушения и надежность судовых конструкций. Горький.: ГПИ.-1987.-С.112-114.
9. Писаренко Г.С., Леонец В.А., Писаренко В.Г. Взаимодействие лазерных импульсов с монокристаллами в связи с проблемой генерации гравитационных волн // Докл. АН УССР.-1985.-Сер.А.-1985.-№11.-С.32-38.
10. Леонец В.А. Термомеханический механизм роста трещин в прозрачном твердом теле, облучаемом лазерным излучением // Научн.-практ. семинар “Применение лазеров в народном хозяйстве, науке и технике” .Тез. докл.: Челябинск: РДНТЭП, 1992.-С25.
11. Леонец В.А., Куліш М.П., Петренко П.В. та інші. Вплив радіаційно-лазерного опромінення на довговічність титанових сплавів та виробів з них//Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій: Тр. Міжнар. конф., 6-9 червня 2000 р. Київ (Україна) / Відп. ред. В.Т.Трощенко-К.: Нац. АН України. Ін-т пробл. міцності, 2000, Логос 2000-Т.2.-С.813-817.
12. Дегтярев В.А. Установка типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности.-1982.-№10.-С.110-113.