

С. В. МЯМЛІН, В. Л. ГОРОБЕЦЬ, О. М. БОНДАРЄВ, І. Є. СКОГАРЄВ,
Є. О. ПИСЬМЕННИЙ (ДІПТ)

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ОПОРУ ВТОМІ МАТЕРІАЛУ НАПІВРОБЛЕНИХ ОСЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ПРОГРЕСІВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

В статті проведений аналіз результатів порівняльних випробувань з визначення границі витривалості матеріалу в напівоброблених осях, виготовлених за різними технологіями та зроблені висновки щодо перспективності та стабільності нової технології виготовлення напівоброблених осей.

Ключові слова: границя витривалості, макроструктура, симетричне навантаження, максимальне напруження, круговий згин, одинарна нормалізація, діаграма втоми

На ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат імені Ф. Е. Дзержинського» розроблена нова технологія виготовлення осей для рухомого складу залізниць. Вдосконалення технологічного процесу виготовлення осей потребує перевірки механічних властивостей сталі, таких як границя витривалості їх матеріалу у порівнянні з осями, виготовленими за традиційною технологією.

В умовах підприємства ВАТ «Дніпродзержинський металургійний комбінат (ДМК)» протягом листопаду 2007 р. – липня 2008 р. спеціалістами Науково-дослідного інституту рухомого складу, колії та транспортних споруд Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна були проведені роботи з розробки та виготовлення відповідних стендів та проведення випробувань зразків, виготовлених із профільних заготовок, на втому, у відповідності до чинної нормативної бази [1, 2].

Випробуванням піддавалися зразки, які виготовлялися з половин осей з однієї плавки № 712715 марки F, виробництва ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат імені Ф. Е. Дзержинського», що пройшли правку при температурі її завершення не нижче 600 °С у відповідності до переліку, наведеного нижче:

- осі, які виготовлені з термообробкою в режимі: одинарна нормалізація та високий відпуск (стандартна технологія) – 2 одиниці;

- осі, які виготовлені з термообробкою в режимі: одинарна нормалізація та регульоване охолодження (самовідпуск) у спеціальних колодязях уповільненого охолодження (температура укладки в колодязі 300...500 °С) – 2 одиниці.

Загальний вигляд напівосей наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вид на півосей, з яких виготовлялися зразки для проведення випробувань на втому

Нижче наведено технологічні дані, стосовно виробництва профільних заготовок для осей плавки 712715 F. Хімічний склад сталі наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі

Етап	Плавочний	За стандартом М101
C	0,5	0,45-0,59
Mn	0,83	0,60-0,90
Si	0,20	min 0,15
S	0,020	< 0,050
P	0,016	< 0,045
Al	0,030	-

Макроструктура вихідної осьової заготовки задовільна та відповідає вимогам нормативної документації, що наведена у табл. 2.

Механічні властивості сталі плавки № 712715, які наведено у табл. 3, та відповідають вимогам стандарту М101.

Таблиця 2

Макроструктура вихідної осевої заготовки

Показник	Балл
Точечна неоднорідність	2/2
Центральна пористість	2/2
Ликваційний квадрат	0/0
Загальна п'ятнисталиквация	0/0
Підсадочна ликвация	0/0

Таблиця 3

Механічні властивості сталі плавки №712715

№ профільних заготовок	485630	485697	Норма
Тимчасовий опір, Н/мм ²	631	667	608
Границя текучості, Н/мм ²	348	363	345
Відносне подовження, %	28	28	22
Звуження, %	51	52	37
Примітки	Одинарна нормалізація та відпуск	Одинарна нормалізація та регульоване охолодження в спеціальних колодязях уповільненого охолодження	

Номери осей, які використовувалися для проведення усіх випробувань наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Номери напівоброблених осей виготовлених за різними технологіями, з яких були виготовлені зразки, на яких були проведені випробування на втому

Номер плавки	Одинарна нормалізація та відпуск	Одинарна нормалізація та регульоване охолодження в спеціальних колодязях уповільненого охолодження
712715	485623	485687
	485629	485690

Всі дослідні осі були механічно розділені на половини (напівосі). З одних половин були виготовлені зразки для випробувань на втому. Нижче, на рис. 2 наведено креслення загально-го вигляду зразків для проведення випробувань на витривалість. У відповідності до наведеного креслення було виготовлено більш 120 зразків з чотирьох напівосей №№ 485623, 485629,

485687, 485690 з їх частин, які розташовано у: шийці (літера Ш), підступиці (літера П), середній частині (літера С).

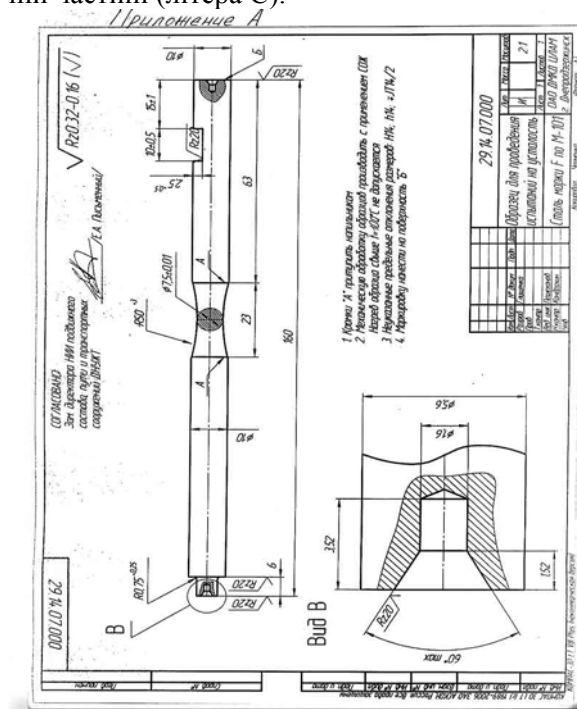


Рис. 2. Креслення зразку для випробувань на втому

Проведення стендових циклічних навантажень (на втому) зразків матеріалу напівоброблених осей, виробництва ВАТ “Дніпровський меткомбінат імені Ф.Е. Дзержинського”, включає в себе наступні етапи:

- навантаження зразків, виготовлених по узгодженому кресленню спробним навантаженням з метою оцінки фактичних механічних характеристик матеріалу зразків;
- відпрацювання штатних режимів випробувань у відповідності до вимог технічного завдання та програми випробувань.

Основним видом навантаження при проведенні випробувань на втому зразків матеріалу напівоброблених осей прийнято круговий згин. Зазначений режим навантаження реалізується на випробувальному стенді шляхом обертання зразків матеріалу, що навантажені постійним зусиллям, яке діє у вертикальній площині.

Основні характеристики циклів навантаження зразків матеріалу об'єктів випробувань наведено нижче:

симетричне навантаження з коефіцієнтом асиметрії циклу $r = -1,0$;

максимальне напруження σ_p в робочому перерізі зразка – в діапазоні $\sigma_{-1} < \sigma_p < \sigma_T$, де σ_{-1} – границя витривалості при симетричному згині; σ_T – границя текучості матеріалу осі.



Рис. 3–5. Загальні види зразків для проведення випробувань на втому

Зразки на втому випробувалися трьома групами з ідентичними параметрами навантаження по напруженню в робочому перерізі зразка з метою побудови кривої витривалості:

жорстке навантаження з кількістю циклів навантаження до руйнування $5 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^6$ циклів;

м'яке навантаження з кількістю циклів навантаження до руйнування $5 \cdot 10^6 - 1,0 \cdot 10^7$ циклів;

середній режим навантаження з кількістю циклів навантаження до руйнування $2 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$ циклів;

Орієнтовні рівні напружень в робочих перерізах зразків наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Орієнтовні рівні напружень у робочих перерізах зразків, які реалізуються в процесі проведення стендових випробувань на втому

№ пор.	Величина, яка вимірюється	Значення
1	Напруження жорсткого режиму навантаження	$\sigma_I = 0,85 \sigma_T$
2	Напруження м'якого режиму навантаження	$\sigma_{II} = 1,05 \sigma_{I1}$
3	Напруження середнього режиму навантаження	$\sigma_{III} = \text{mid} \{ \sigma_I, \sigma_{II} \}$

Нижче на рис. 6–8 наведено вигляд випробувального стенду; положення зразку у випробувальному стенді; випробувальної станції для проведення випробувань на втому.



Рис. 6. Загальний вигляд стенда для проведення випробувань зразків на втому

Напруження при проведенні циклічного навантаження оцінюють розрахунковим шляхом [3] як:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{зг}}{W_z};$$

$$M_{зг} = Pl_{рзр};$$

$$W_z = \frac{\pi d_p^3}{32}. \quad (1)$$

де σ_{\max} – максимальне напруження в робочому перерізі зразку при згині; $M_{зг}$ – момент згину; $l_{рзр}$ – робоча довжина зразку (відстань між віссю прикладання ваги та робочим перерізом зразку); W_z – момент опору згину; d_p – діаметр робочого перерізу зразку.



Рис. 7. Положення випробувального зразку у випробувальному стенді



Рис. 8. Загальний вигляд випробувальної станції для проведення випробувань матеріалів на втоми

За рівнем навантаження зразків матеріалу визначаються середні значення реалізованого напруження та кількості циклів до руйнування деталі. Далі в напівлогарифмічних координатах будується пряма, що апроксимує криву витривалості для кожного варіанту термічної обробки об'єкту випробувань.

На рис. 9 наведено поперечні перерізи зразків, на яких показано характер руйнування

З метою простішого співставлення результатів, методологія випробувань була прийнята на підставі робіт [4] аналогічного спрямування.

Критерієм успішного випробування є характеристик витривалості осей, оброблених за технологією термообробки нормалізація та регульоване охолодження, які повинні бути не гірше, порівняно з аналогічними характеристиками осей, що отримали термообробку у вигляді нормалізації та високого відпуску.



Рис. 9. Види перерізів зразків в місцях їх руйнування

На підставі отриманих результатів випробувань були побудовані криві втоми (діаграми Велера) для зразків, які виготовлені з відповідних частин напівосей (рис. 10–21). На цих діаг-

рамах по осі абсцис відкладено значення логарифмів загальних кількостей циклів $\lg N$, які витримували відповідні зразки від початку випробувань і до моменту руйнування при відповідній амплітуді напружень циклу σ .

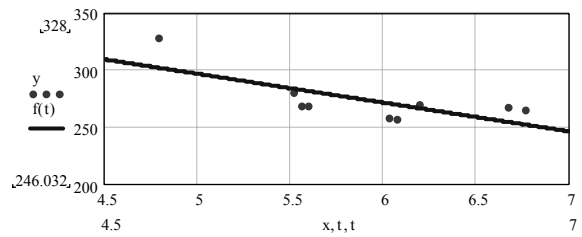


Рис. 10. Діаграма втоми для зразків виготовлених з шийки напівосі 485690 (Ш690)

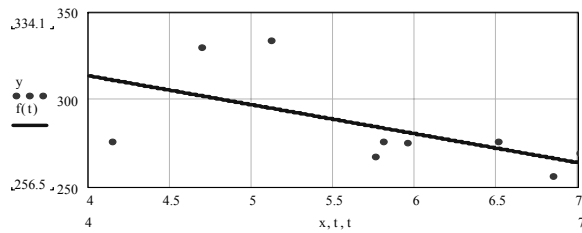


Рис. 11. Діаграма втоми для зразків виготовлених з підступиці напівосі 485690 (П690)

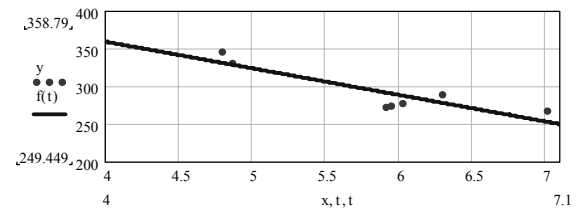


Рис. 12. Діаграма втоми для зразків виготовлених з середини напівосі 485690 (С690)

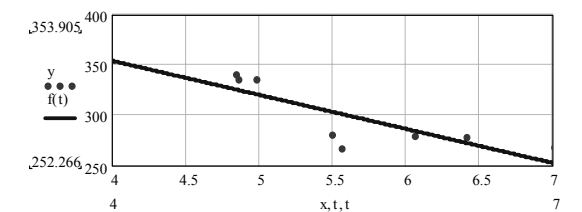


Рис. 13. Діаграма втоми для зразків виготовлених з шийки напівосі 485687 (Ш687)

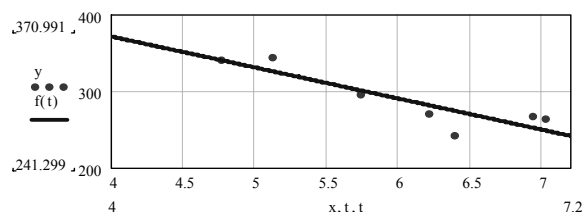


Рис. 14. Діаграма втоми для зразків виготовлених з підступиці напівосі 485687 (П687)

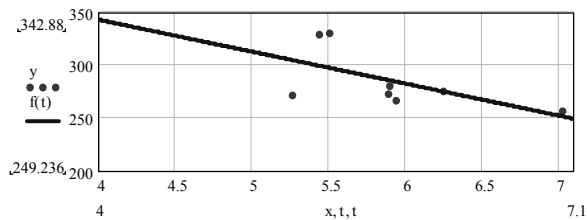


Рис. 15. Діаграма втоми для зразків виготовлених з середини напівосі 485687 (С687)

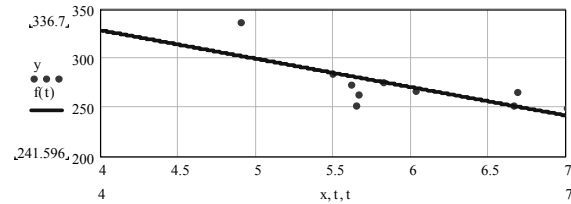


Рис. 16. Діаграма втоми для зразків виготовлених з шийки напівосі 485623 (Ш623)

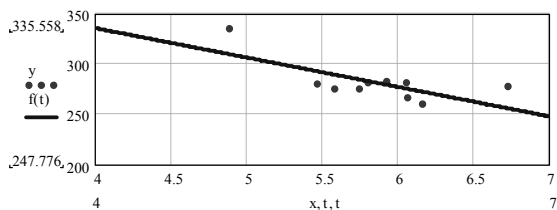


Рис. 17. Діаграма втоми для зразків виготовлених з підступиці напівосі 485623 (П623)

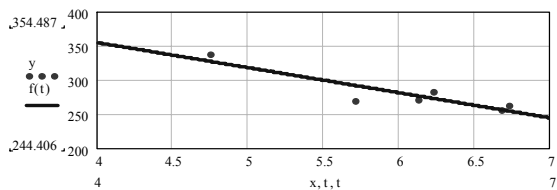


Рис. 18. Діаграма втоми для зразків виготовлених з середини напівосі 485623 (С623)

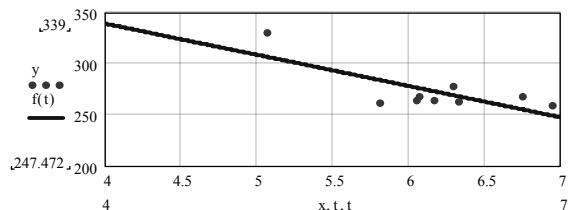


Рис. 19. Діаграма втоми для зразків виготовлених з шийки напівосі 485629 (Ш 629)

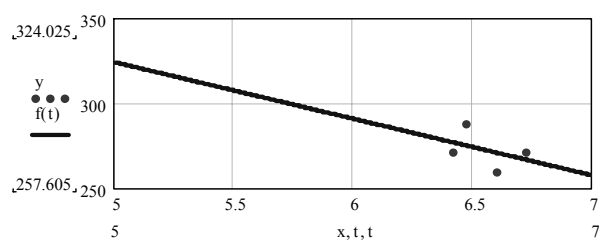


Рис. 20. Діаграма втоми для зразків виготовлених з підступиці напівосі 485629 (П 629)

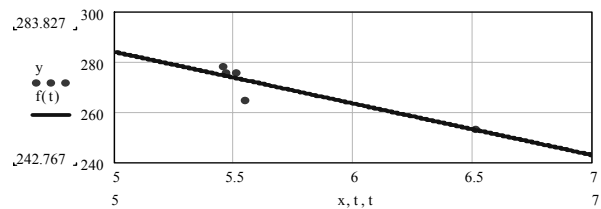


Рис. 21. Діаграма втоми для зразків виготовлених з середини напівосі 485629 (С629)

Нижче на рисунках крапками позначено результати експериментальних випробувань, а лінії відповідають регресійним залежностям, параметри яких визначено з використанням методу найменших квадратів у відповідності до результатів експериментальних даних. Вихідні дані були попередньо відсортовані (згладжені) з виключенням даних, які не завершувалися штатним руйнуванням зразків.

Чисельні значення границь витривалості, середні значення та середньоквадратичні відхилення значень границь витривалості від відповідних середніх значень наведено у табл. 6.

У табл. 6 у третьому стовпчику наведено прогнозовані значення границь витривалості при симетричному циклі σ_{-1} , які визначені за отриманими регресійними залежностями результатів експериментальних випробувань.

З урахуванням можливості виключення з розгляду зайвої кількості зразків, з метою додаткового контролю вірогідності отриманих результатів, на рис. 22-24 наведено порівняльні результати випробувань на втому з урахуванням повної кількості зруйнованих зразків. При цьому кількість даних в області напружень, наближених до малоциклової втоми, були взяті однаковими для кожного типу технології з метою зниження впливу їх на область багатоциклової втоми.

Таблиця 6

Величини границь витривалості

№ пор.	Позначення зразків	Статистичні характеристики границь витривалості		
		Границі витривалості для типу зразків при $N_0=10^7$ циклів	Середнє значення границі витривалості для типу осі	Середньоквадратичне відхилення границь витривалості від відповідних середніх значень для типу осі
1	Ш690	246,0	251,2	4,29
2	П690	256,5		
3	С690	251,0		
4	Ш687	252,3	249,1	4,11
5	П687	243,3		
6	С687	251,7		

Закінчення табл. 6

№ пор.	Позначення зразків	Статистичні характеристики границь витривалості		
		Границі витривалості для типу зразків при $N_0=10^7$ циклів	Середнє значення границі витривалості для типу осей	Середньоквадратичне відхилення границь витривалості від відповідних середніх значень для типу осей
7	Ш623	241,6	245,1	3,1
8	П623	247,8		
9	С623	244,4		
10	Ш629	247,5	249,3	7,56
11	П629	257,6		
12	С629	242,8		

На вказаних рисунках наведено апроксимації ліній витривалості за допомогою лінійного тренду (прямі з підписом „лінійний”), а також показники достовірності вказаної апроксимації.

Зауважимо, що всі лінії мають приблизно однаковий рівень ймовірності, що може бути обумовлений як особливістю технології виготовлення зразків, так і, власне, самих осей. Таким чином, наведені дані придатні для порівняльного аналізу.

Таким чином, технологія одинарної нормалізації з регульованим охолодженням в спеціальних колодязях уповільненого охолодження

(нова технологія) не гірша за традиційну й за розширеним обсягом експериментальних даних. В середній частині осей для традиційної технології отримано показники опору втомі, дещо кращі, ніж для нової.

Але при цьому, порівнюючи положення кривих (або прямих у напівлогарифмічних координатах) втомі, слід зазначити, що технологія з використанням одинарної нормалізації та регульованого охолодження в спеціальних колодязях уповільненого охолодження дає більш стабільне її положення для різних частин досліджених осей.

Висновки

Порівняння результатів випробувань за згладженими оцінками та за розширеним обсягом даних дає можливість зробити висновок про те, що використання технології обробки осей з використанням одинарної нормалізації та регульованого охолодження в спеціальних колодязях уповільненого охолодження дає більш стабільні, не гірші, а в деяких випадках (шийка та підступична частина осей), трохи кращі результати у порівнянні з технологією, де використовується одинарна нормалізація та відпуск.

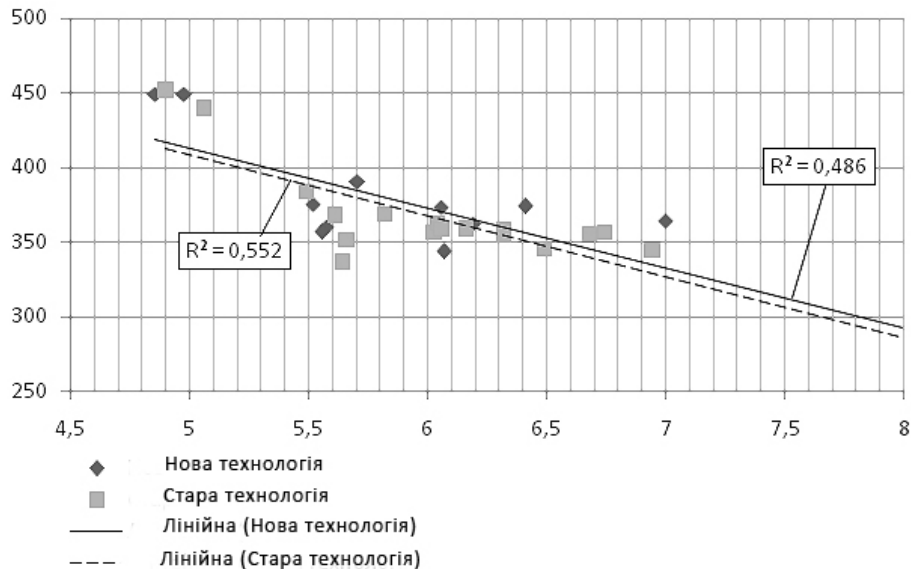


Рис. 22. Порівняння характеристик опору втомі осей за даними випробувань розширеної кількості зразків. Шийка осей

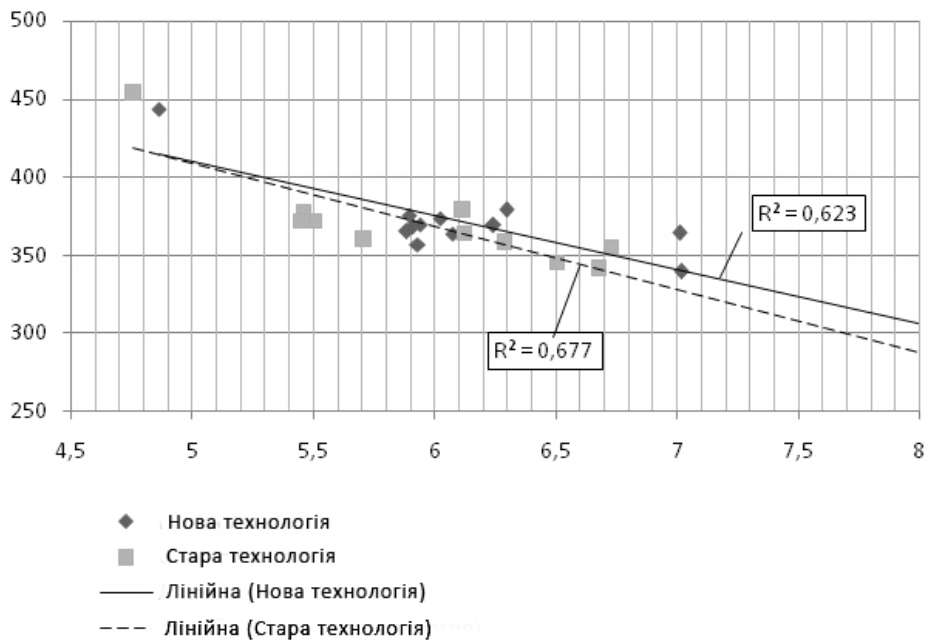


Рис. 23. Порівняння характеристик опору втомі осей за даними випробувань розширеної кількості зразків. Підступична частина осі

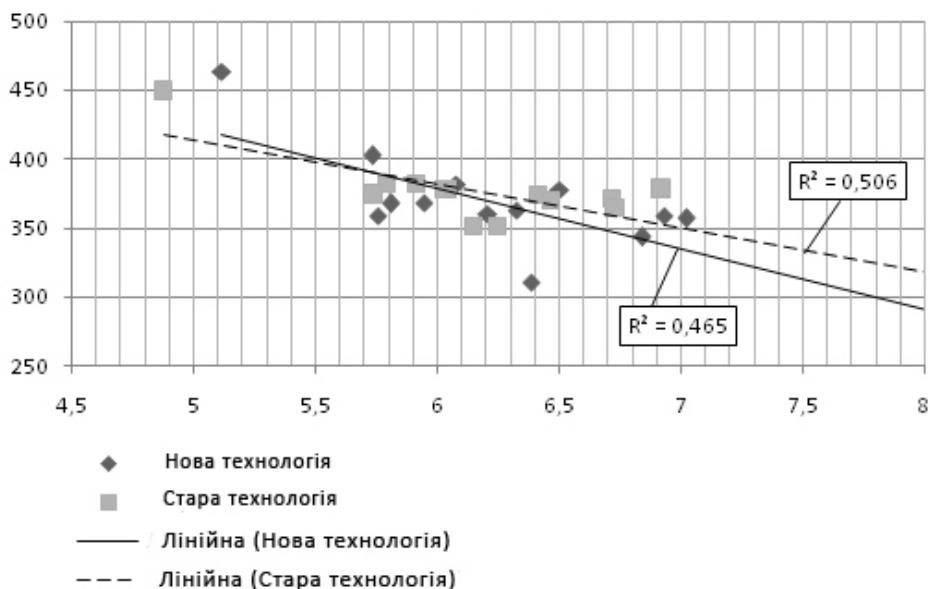


Рис. 24. Порівняння характеристик опору втомі осей за даними випробувань розширеної кількості зразків. Середня частина осі

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М. : ВНИИВ, 1983. – 260с.
2. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов [Текст]. – М. : Госстандарт СССР, 1979. – 34 с.
3. Смирнов, А. Ф. Сопротивление материалов [Текст] / А. Ф. Смирнов. – М. : Высш. шк., 1975. – 480 с.
4. Дальман, Д. Э. Способы предотвращения поломки осей грузовых вагонов [Текст] / Д. Э. Дальман, К. П. Лонсдейл, С. Л. Дедмон // Документы 15-го Межд. конгресса по колесам и парам. – Прага, Чехия, 2007.

Надійшла до редколегії 30.11.2011.
 Прийнята до друку 01.12.2011.

С. В. МЯМЛИН, В. Л. ГОРОБЕЦ, А. М. БОНДАРЕВ, И. Е. СКОГАРЕВ,
Е. А. ПИСЬМЕННЫЙ (ДИИТ)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛА ПОЛУОБРАБОТАННЫХ ОСЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ПРОГРЕССИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

В статье проведен анализ результатов сравнительных испытаний по определению границы выносливости материала в полуобработанных осях, изготовленных по разным технологиям и сделаны выводы о перспективности и стабильности новой технологии изготовления полуобработанных осей.

Ключевые слова: предел выносливости, макроструктура, симметричная нагрузка, предельное напряжение, круговой изгиб, одинарная нормализация, диаграмма усталости

S. V. MYAMLIN, V. L. GOROBETS, A. N. BONDAREV, I. Ye. SKOGAREV,
Ye. A. PISMENNY (DIIT)

COMPARATIVE EVALUATION OF FATIGUE RESISTANCE OF MATERIAL FOR SEMI-TREATED AXLES PRODUCED BY ADVANCED TECHNOLOGIES

In the article the analysis of results of comparative tests on determination of endurance limit of the material in semi-treated axles produced by different technologies is carried out and the conclusions on prospects and stability of new manufacturing technologies for the semi-treated axles are drawn.

Keywords: endurance limit, macrostructure, symmetric loading, limiting tension, circular bend, unary normalization, fatigue chart