

Оцінка зношування контактних напайок з композиційних матеріалів контакторів електровозів змінного струму

О. А. Тетерко, М. О. Баб'як, Т. Й. Синявський

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
ім. академіка В. Лазаряна, Львівська філія

Розглянуто результати експериментальних досліджень технологічного та експлуатаційного зношування контактних напайок. Визначено ймовірність безвідмовної роботи за критерієм товщини напайки при різних пробігах електровозів для різних матеріалів контактних напайок, а також отримано γ -відсотковий ресурс контактів.

Ключові слова: контактор, контактна напайка, зношування, ймовірність, ерозія, надійність, ресурс.

Відповідно до концепції розвитку залізничного транспорту України продовжується термін експлуатації існуючого рухомого складу, зокрема електровозів змінного струму ВЛ80^Т. Актуальність проблеми заміни мідно-вольфрамівих напайок розривних контактів головного контролера ЕКГ-8Ж та електропневматичних контакторів ПК-96-101 підкреслюється підвищенням світових цін на кольорові метали та їх відсутністю в Україні. Метою даної роботи є аналіз експлуатаційних характеристик матеріалів вітчизняних виробників, зокрема: № 4 — “Інтер-Контакт-Пріор” (м. Київ); № 5, 6 — ПП “Власов” (м. Запоріжжя); № 9 — МДК, НВП “Геконт” (м. Вінниця), як альтернативи матеріалу (в роботі — № 3) виробництва заводу “Електроконтакт” (Росія).

У процесі експлуатації контактних з'єднань відбувається зношування їх напайок, як при огляді та ремонті, так і безпосередньо під час комутації силових електричних кіл. Зменшення маси та товщини контактних напайок при ремонті називають технологічним зношуванням, а при переключеннях — експлуатаційним. Нами було досліджено зношування напайок з композиційних матеріалів на силові контактори електровозів змінного струму, а саме контактори головного контролера ЕКГ-8Ж та електропневматичні контактори ПК-96-101. Попередні результати та особливості процесу зношування напайок з досліджуваних матеріалів опубліковані в роботах [1, 2]. У даній роботі розглянуто результати досліджень технологічного та експлуатаційного зношування, визначено ймовірність безвідмовної роботи за критерієм товщини напайки при різних пробігах електровозів для різноманітних матеріалів контактних напайок, а також отримано γ -відсотковий ресурс контактів.

Отже, при обробці робочої поверхні контактів контакторів на технічному огляді чи будь-якому виді поточного ремонту відбувається так зване технологічне зношування електроконтактних з'єднань, яке полягає у зменшенні товщини напайок контактів і маси металу. Найбільш

© О. А. Тетерко, М. О. Баб'як, Т. Й. Синявський, 2010

Т а б л и ц я 1. Технологічне зношування розривних контактів ЕКГ-8Ж

Номер контакту, його виробник	Маса знятого металу, г
№ 3, “Електроконтакт”	1,54
№ 4, “Інтер-Контакт-Пріор”	2,09
№5, “Власов” з просочуванням	1,82
№ 6, “Власов” без просочування	1,73
№ 9, МДК	1,52

суттєво піддаються технологічному зношуванню розривні контакти контакторів ЕКГ-8Ж через значне ушкодження електричною дугою. У табл. 1 наведена середня маса знятого металу мідно-вольфрамових контактів при їх обробці під час періодичного ремонту, або технологічні втрати металу.

Ремонтна обробка губок контактів, по-перше, необхідна, бо відновлюється їх конструкційна форма і тим самим контактна поверхня S_k стає оптимальною, а це суттєво впливає на величину контактного опору R_k (при малих S_k збільшуються R_k і T_k). По-друге, зачищені контакти при однаковій S_k мають R_k у декілька разів менший, ніж не зачищені через зняття поверхневої плівки.

Як впливає з табл. 1, технологічне зношування є найбільшим для матеріалу виробництва “Інтер-Контакт-Пріор”. Це викликано тим, що напайки з цього матеріалу, як показали експлуатаційні випробування, найбільше піддаються утворенню раковин у порівнянні з напайками із інших матеріалів. Як наслідок, для надання контактній поверхні необхідної форми потрібно знімати більший шар металу. Значне технологічне зношування характерне для контактів таких контакторів, у яких погано відрегульована кінематика і, як наслідок, відбувається зміщення рухомого контакту відносно нерухомого. При цьому виникають великі виступи на контактній поверхні (рис. 1).

Технологічна обробка контактів вносить свою долю у збільшення експлуатаційного зношування, оскільки після неї, в початковий період роботи контактів, кожен раз відбувається їх притирання, при якому зношування в 4—5 разів інтенсивніше, ніж під час нормальної експлуатації.



Рис. 1. Виступи на контактних поверхнях, викликані зміщенням контактів: *a* — матеріал № 3; *б* — матеріал № 4.

Зачистка контактів, дійсно, значно знижує їх довговічність, але стверджувати, що вона є некорисною і навіть шкідливою, не зовсім справедливо, оскільки ремонтна обробка має свої позитивні сторони. Тим більше, що не оброблений розривний контакт може погано пропускати струм при розмиканні контактора, а це викличе виникнення електричної дуги на головних контактах, які для цього не призначені.

Під час експлуатації комутуючі контакти піддаються зношуванню: механічному і електричному. Притому визначальним є зношування під дією дуги, тобто електрична дугова ерозія, особливо для сильноточових контактів, які досліджували в цій роботі.

Як відомо, електроерозійна стійкість контактів в основному визначається матеріалом контактів та параметрами електричної дуги. Стендові випробування базових контактів контакторів з дугогасінням головного контролера ЕКГ-8Ж показали, що середній термін горіння дуги на контактах складає ~8 мс. Середній термін гасіння дуги при розмиканні струмів 1500—2000 А дорівнює 6,5—7 мс, а максимальний термін досягає 14 мс. Випробування на зносостійкість при $I = 1500$ А, 30 вимиканнях у хвилину та швидкості розходження контактів 0,8—0,9 м/с свідчать, що після 2500 вимикань зношування розривних контактів складає ~0,35 мм. А повне зношування базових напайок цих контактів спостерігається після $(5,8—6,2) \cdot 10^3$ циклів, що є недостатнім для існуючих умов експлуатації електровозів, оскільки їх заміна передбачена при пробігу 200 тис. км.

Система ремонту, що призначена для попередження поступових відмов, будується на принципі планово-попереджувальних ремонтів. При цьому намагаються так будувати цю систему, щоб як можна повніше вичерпати ресурс деталей та вузлів, що закладений при їх виготовленні чи повному відновленні. Системи контактних з'єднань електроапаратів електровозів у повній мірі підпадають під ці критерії. Отже, будемо задавати ресурс контактів, наприклад, із умови необхідності планового ремонту всієї одиниці електрорухомого складу. Зараз, як відомо, при визначенні періодичності ремонтів мірою напрацювання на відмову ЕРС є лінійний пробіг l . Навіть у межах однієї ділянки певної залізниці умови експлуатації одного і того ж електровоза різні в силу варіації маси поїздів, стану колії, розкладу руху поїздів та ін. Тому величина лінійного пробігу l контактів до граничного стану за їх експлуатаційним зношуванням (до відмови) є випадковою величиною. В цьому разі безвідмовність

контактних з'єднань з контактами із різних матеріалів будемо оцінювати за значенням ймовірності безвідмовної роботи $P(l)$ для різних лінійних пробігів L_p за відомою формулою

$$P(l) = I_{\text{мов}}(l > L_p) = \int_{L_p}^{\infty} f(l) dl, \quad (1)$$

де $f(l)$ — густина розподілення випадкової величини l .

Для визначення ймовірнісного теоретичного закону $f(l)$ для різних матеріалів, користуючись реалізаціями зношування, одержали пробіги l контактів до відмови, тобто їх ресурс. Під останнім в цій роботі прийнято повне зношування напайки контакту до товщини 4 мм для всіх матеріалів, за виключенням МДК (№ 9), для яких повне зношування прийнято до 5 мм

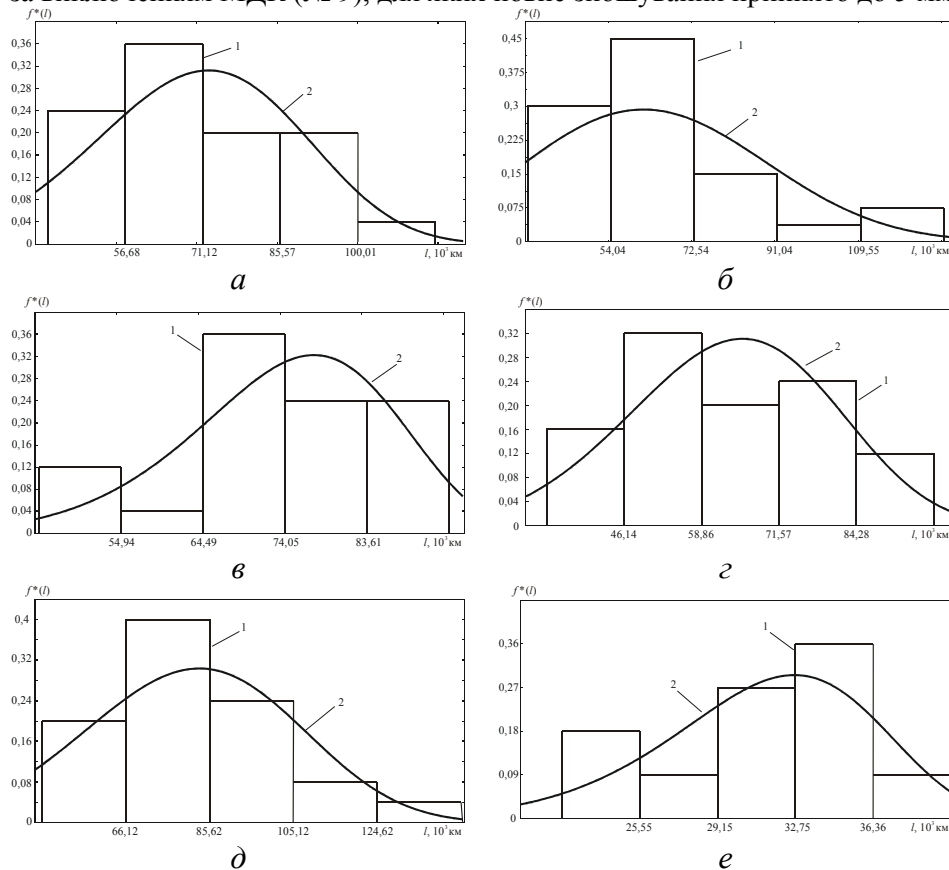


Рис. 2. Гістограми (1) та теоретичні закони розподілення (2) величини пробігу l до відмови контактів з матеріалів: *a* — № 3, "Электроконтакт"; *б* — № 4, "Интер-Контакт-Приор"; *в* — № 5, "Власов" з просочуванням; *г* — № 6, "Власов" без просочування; *д* — № 9, МДК; *е* — № 10, "Диском".

(через те, що напайки з цього матеріалу виробляють лише товщиною 3 мм). Гістограми і теоретичні закони розподілення величини l приведено на рис. 2, а їх параметри — у табл. 2.

Т а б л и ц я 2. Параметри статистичних розподілень пробігів до параметричної відмови

Матеріал контактів	Математичне очікування, км	Середньоквадратичне відхилення σ_l , км	Асиметрія As	Експес Ex
№ 3 ”Електроконтакт”	70 159,58	17 551,9	0,75	0,25
№ 4, “Інтер-Контакт-Пріор”	63 758,74	23 505,27	1,49	2,08
№ 5, “Власов” з просочуванням	73 943,8	12 775,27	-0,60	0,16
№ 6, “Власов” без просочування	63 438,77	16 248,69	0,34	-0,57
№ 9, МДК	124 565,63	21 996,03	1,05	1,68
№ 10, “Диском”	31 280,18	5200,15	-0,49	0,27

Вигляд реалізацій зношування свідчить про те, що вони близькі до лінійних із сильним перемішуванням [2]. Це дозволяє припустити, що процес зношування контактів може бути відображений моделлю накопичувальних пошкоджень [3], якій частіше за все відповідає гамма-розподіленню напрацювання на відмову. Проте, як показує апроксимація гістограм величини пробігу (рис. 2), закону гамма-розподілення (з ймовірністю $p = 0,14—0,19$ за Пірсоном) підпорядковуються гістограми величини l лише для контактів з матеріалів виробництва “Електроконтакт” (рис. 2, а), “Інтер-Контакт-Пріор” (рис. 2, б) і МДК (рис. 2, д). Це пояснюється тим, що друга умова моделі — сильне перемішування — найбільш характерна для цих реалізацій зношування. Тоді густина розподілення $f(l)$ за гамма-законом запишеться у вигляді

$$f(l) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \cdot \lambda^r \cdot l^{r-1} \cdot e^{-\lambda l} & \text{при } \lambda \leq l \leq \infty, \\ 0 & \text{при } \lambda < 0, \end{cases} \quad (2)$$

де λ — параметр масштабу, $\lambda > 0$; r — параметр “форми”, $r > 0$; $\Gamma(r)$ — гамма-функція Ейлера, яку визначають за формулою

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} \cdot e^{-x} dx; \quad (3)$$

для цілих r функція $\Gamma(r) = (r-1)!$

Параметри r та λ визначають за емпіричним середнім \bar{l} та дисперсією σ_l^2 (табл. 2) пробігу до відмови за виразами [3, с. 62]:

$$r = \frac{\bar{l}^2}{\sigma_l^2}; \quad \lambda = \frac{\bar{l}}{\sigma_l^2}. \quad (4)$$

Їх чисельні значення для зазначених матеріалів наведено у табл. 3.

Практичне знаходження ймовірності $P(l)$ у випадках, коли пробіг l підкоряється гама-розподіленню, можливе як за формулою (1), так і за номограмою, наведеною у роботі [3, с. 56].

Значення l до відмови контактних з'єднань із матеріалів “Власов” з просочуванням (рис. 2, в) і “Диском” (рис. 2, е) (з $p = 0,1—0,12$ за Пірсоном) підкоряються логарифмічно-нормальному розподіленню

$$f(l) = \begin{cases} \frac{A}{l \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(\lg l - c)^2}{2\sigma^2}\right] & \text{при } l \geq 0, \\ 0 & \text{при } l < 0, \end{cases} \quad (5)$$

де $A = \lg e = 0,4343$, а параметри c і σ зв'язані з математичним очікуванням $M\{l\} = \bar{l}$ і дисперсією $D\{l\} = \sigma_l^2$ величини l такими виразами [3, с. 86]:

$$M\{l\} = \bar{l} = \exp\left[\frac{c}{A} + \frac{\sigma^2}{2A^2}\right]; \quad (6)$$

$$D\{l\} = \sigma_l^2 = \exp\left[\frac{2c}{A} + \frac{\sigma^2}{A^2}\right] \cdot \left[\exp\left(\frac{\sigma^2}{A^2}\right) - 1\right]. \quad (7)$$

У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи контактів протягом пробігу L_p будемо визначати за формулою

$$P\{l > L_p\} = 1 - \Phi\left(\frac{\lg l - c}{\sigma}\right), \quad (8)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du$ — функція Лапласа [3, с. 68 і 161].

Розподілення пробігів l для контактів із матеріалу “Власов” без просочування (рис. 2, з) підкоряється закону Гаусса з параметрами: $\bar{l} = 66,57$ тис. км; $\sigma_l = 18,896$ тис. км; $A_s = 0,12$; $E_x = 0,43$.

Користуючись виразами (1), (2), (5), (8), номограмою для гама-розподілення та даними табл. 3, чисельно визначили ймовірність безвідмовної роботи $P(l)$ контактів із різних матеріалів для різних значень пробігу L_p : 20, 40, 50, 60, 80 і 100 тис. км, що представлено у табл. 3.

Також знайдено значення гама-відсоткового ресурсу L_γ контактних з'єднань (табл. 4); L_γ — пробіг, при якому ймовірність безвідмовної роботи $P(l)$ дорівнює заданому значенню γ (%).

Окрім величин $P(l)$ (табл. 3) і L_γ (табл. 4), важливим показником параметричної надійності є середній термін служби або середнє напрацювання до відмови, який визначають як математичне очікування величини напрацювання до відмови, у нашому випадку — як математичне очікування пробігу L_{cp} параметричної відмови, тобто

$$L_{cp} = M\{l\} = \int_0^{\infty} l \cdot f(l) dl. \quad (9)$$

Згідно з експериментальними даними, наведеними у табл. 2, величина L_{cp} для контактних з'єднань із різних матеріалів (відповідно до їх назв) дорівнює (тис. км): 70,159; 63,758; 73,943; 63,438; 124,566; 31,280.

Проаналізувавши отримані ресурси і ймовірності безвідмовної роботи, бачимо, що найбільш надійні і довговічні (за критерієм зношування) є

Т а б л и ц я 3. Ймовірність безвідмовної роботи контактів із різних матеріалів за критерієм їх зношування

Матеріал контактів	Статистичне розподілення пробігів l до відмови					Ймовірність безвідмовної роботи $P(l)$ для пробігів L_p , тис. км					
	Закон розподілення	Параметри закону				20	40	50	60	80	100
		r	$\lambda, \cdot 10^{-3}$ 1/тис. км	\bar{l} , тис. км	σ_l , тис. км						
№ 3	Гама-розпод.	15,8	0,243	—	—	0,9995	0,97	0,81	0,61	0,12	0,03
№ 4	Гама-розпод.	9,4	0,150	—	—	0,995	0,71	0,62	0,55	0,15	0,05
№ 5	Логарифмічно-нормальний	—	—	71,92 5	12,49 5	1,0	0,997	0,95	0,65	0,25	0,01
№ 6	Гаусса	—	—	66,57	18,89 6	0,996	0,93	0,81	0,62	0,17	0,05
№ 9	Гама-розпод.	32,1	0,257	—	—	1,0	1,0	0,999 98	0,999 5	0,98 5	0,93
№ 10	Логарифмічно-нормальний	—	—	27,63 7	7,416	0,840	0,08	0,01	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}

Т а б л и ц я 4. Значення γ -відсоткового ресурсу L_γ контактів

Матеріал контактів	Пробіг L_γ , тис. км				
	40	50	60	70	95
№ 3	65,88	61,76	57,64	53,52	39,11
№ 4	65,0	60,0	56,67	51,00	33,33
№ 5, з просочуванням	69,46	65,12	62,95	60,78	52,1
№ 6, без просочування	67,05	61,68	57,39	53,64	37,55
№ 9	116,73	112,84	108,95	105,06	85,6
№ 10	27,88	25,90	23,86	21,90	15,93
Рівень надійності $P(l), \gamma, \%$	40	50	60	70	95

контакти з напайками із матеріалу № 9 (МДК) ймовірність безвідмовної роботи яких при пробігу 100 тис. км дорівнює 0,93, тоді як для інших матеріалів вона знаходиться в межах 0,01—0,05, а для матеріалу № 10 взагалі складає 10^{-6} . Значення γ -відсоткового ресурсу L_γ контактів показують, що, наприклад, 5% контактів будуть мати товщину менше 4 мм після пробігу 85,6 тис. км для матеріалу № 9 (МДК). Найменший 5%-ий ресурс у матеріалу № 10 (“Диском”), який становить 15,93 тис. км.

Високий рівень надійності матеріалу № 9 у порівнянні з іншими обумовлений його властивостями, а саме більшою твердістю і порівняно високою температурою плавлення, що особливо важливо при розриві електричної дуги.

На даний час передбачається продовження дослідження зносостійкості розривних контактів на основі заліза, як дешевих у виготовленні та ремонті.

1. Тетерко О. А., Баб'як М. О., Костін М. О. Експлуатаційна надійність контактних з'єднань електропневматичних контакторів та контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму // Вісник ДНУЗТ. — 2007. — Вип. 18. — С. 41—45.
2. Тетерко О. А. Результати експлуатаційних випробувань відновлених електричних контактів контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму // Електротехніка і електромеханіка. — 2007. — № 4. — С. 53—56.
3. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов. — М.: Сов. радио, 1966. — 166 с.

Оценка изнашивания контактных напаяк из композиционных материалов контакторов электровозов переменного тока

А. А. Тетерко, Н. А. Бабяк, Т. Й. Синявский

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований технологического и эксплуатационного изнашивания контактных напаяк. Определена вероятность безотказной работы по критерию толщины напайки при разных пробегах электровозов для различных материалов контактных напаяк, а также получен γ -процентный ресурс контактов.

Ключевые слова: контактор, контактная напайка, изнашивание, вероятность, эрозия, надёжность, ресурс.

Estimation of wear of contact brazing from composition materials of contactors of alternating current electric locomotives

A. Teterko, M. Babjak, T. Synyavskyy

The results of experimental researches of technological and operating wear of contact brazing are resulted in work. It is indicated on the negative sides of repair treatment of contact brazing, but also its necessity is argued. The features of wear of contact brazing from different materials are considered. Probability of faultless work after the criterion of thickness of brazing at the different runs of electric locomotives for different materials of contact brazing, and also γ -percent resource of contacts is got. Histograms and theoretical laws of distributing of runs l of electric locomotives are resulted to the refuse of contacts from the probed materials. A conclusion is given in relation to the most reliable and lasting material for brazing on the contacts of contactors EKG-8 and PC-96-101.

Keywords: contactor, contact brazing, wear, probability, erosion, reliability, resource