УДК 620.178.325.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-92-102

МЕТОД УСКОРЕННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

[1]Ли Роман Иннакентьевич
[2]Псарев Дмитрий Николаевич
[3]Киба Мария Романовна
[1]Мельников Антон Юрьевич
[1]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»
[2]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»
[3]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный горный университет»

Реферат. *Рассматриваются вопросы долговечности подшипниковых узлов в трансмиссии автомобилей, которая в значительной мере определяется износом посадочных мест подшипников из-за фреттинг-коррозии. Установлено, что их восстановление полимерными материалами может полностью устранить фреттинг-коррозию, существенно увеличить ресурс подшипниковых узлов и снизить затраты на ремонт автомобилей. Долговечность восстановленной посадки зависит от ресурса полимерного слоя между сопрягаемыми поверхностями деталей подшипникового узла и поэтому актуальным вопросом является исследование выносливости новых полимерных материалов при циклическом нагружении. Выявлено, что общим недостатком известных методов усталостных испытаний является ограниченная пригодность для образцов различных типоразмеров (масштабный фактор). Проведен обзор и анализ методов усталостных испытаний и в итоге отобраны: метод Локати, метод одного образца, метод Кудрявцева, метод Кравченко, метод Шубина. Предложен новый метод ускоренных стендовых испытаний на выносливость полимерных материалов в основе которого лежат методы Шубина и Кравченко. Первоначально определяется долговечность полимерных посадок при циклическом нагружении с тремя заданными значениями толщины полимерного покрытия. По результатам стендовых испытаний строится зависимость толщины покрытия от величины обратной количеству циклов нагружения. Максимально допустимую толщину полимерной посадки следует определять экстраполяцией графической зависимости до пересечения ее с осью ординат (толщина покрытия). Метод включает расчет и использование оригинального критерия подобия, что позволит использовать результаты стендовых испытаний для определения максимально допустимой толщины полимерной посадки для любого типоразмера подшипника качения. Контрольный эксперимент подтвердил объективность и корректность нового метода.*

Ключевые слова: *восстановление, подшипник, посадка, полимер, выносливость, испытания.*

ACCELERATED FATIGUE TEST METHOD POLYMER MATERIALS

[1]Li Roman
[2]Psarev Dmitry
[3]Kiba Maria
[1]Melnikov Anton
[1]FSBEI HE "Lipetsk State Technical University"
[2]FGBOU VO "Michurinsky State Agrarian University"
[3]FSBEI HE "St. Petersburg State Mining University"

Abstract. *The issues of durability of bearing assemblies in car transmissions, which are largely determined by the wear of bearing seats due to fretting corrosion, are considered. It has been established that their restoration with polymeric materials can completely eliminate fretting corrosion, significantly*

increase the service life of bearing assemblies and reduce the cost of car repairs. The durability of the restored fit depends on the resource of the polymer layer between the mating surfaces of the parts of the bearing assembly, and therefore the study of the endurance of new polymeric materials under cyclic loading is an urgent issue. t was revealed that a common drawback of the known methods of fatigue testing is the limited suitability for specimens of various sizes (scale factor). A review and analysis of fatigue testing methods was carried out and, as a result, the following were selected: the Lokati method, the one-sample method, the Kudryavtsev method, the Kravchenko method, the Shubin method. A new method of accelerated bench tests for the endurance of polymer materials is proposed, which is based on the methods of Shubin and Kravchenko. Initially, the durability of polymer fits under cyclic loading is determined with three specified values of the thickness of the polymer coating. The maximum allowable thickness of the polymer fit should be determined by extrapolation of the graphical dependence until it intersects with the ordinate axis (coating thickness). The method includes calculating and using the original similarity criterion, which will allow using the results of bench tests to determine the maximum allowable thickness of the polymer fit for any type of rolling bearing size. The control experiment confirmed the objectivity and correctness of the new method.

Keywords: *recovery, bearing, fit, polymer, endurance, testing.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90070\20).

Введение. Снижение работоспособности подшипниковых узлов в трансмиссии автомобилей связано прежде всего с износом посадочных мест подшипников из-за фреттинг-коррозии. Использование полимерных материалов для восстановления посадочных мест подшипников качения позволит не только устранить появление фреттинг-коррозии, но и значительно повысит ресурс подшипниковых узлов и снизит затраты на ремонт техники [1-8]. Долговечность восстановленной посадки в этом случае определяется ресурсом полимерного слоя между сопрягаемыми поверхностями деталей подшипникового узла, поэтому исследование стойкости полимерного материала к воздействию циклических нагрузок (выносливости) является актуальной задачей. Исследование выносливости конструкционных материалов осуществляют при усталостных стендовых испытаниях, которые проводят по различным методикам. Известные методы усталостных испытаний имеют общий недостаток: результаты испытаний пригодны для использования в ограниченном диапазоне типоразмеров образцов (масштабный фактор). В работе Щетинина предложено при исследовании выносливости полимерных материалов использовать оригинальный критерий подобия. Им разработаны основы физического моделирования долговечности полимерных посадок подшипников качения при циклическом нагружении [9]. На основе проведенных теоретических исследований с использованием второй теоремы подобия и теории размерности был получен критерий подобия π_1, показывающий взаимосвязь характеристик полимерного слоя с амплитудой напряжений и долговечностью восстановленной полимерной посадки.

$$\pi_1 = \frac{K(hS)^2}{\sigma_a} \tag{1}$$

где h – толщина полимерного слоя, м; S – площадь полимерного слоя, м^2; K – величина, постоянная для данного полимерного материала, $K = \frac{\rho \Delta F}{M}$; ρ – плотность полимерного материала, кг/м^3; M – молярная масса полимерного материала, кг/моль.

Проводятся стендовые испытания долговечности полимерной посадки подшипника определенного типоразмера по методике Шубина [10…13]. По результатам испытаний строится кривая Веллера и определяется максимально допустимая толщина полимерного слоя $[h]$, при которой материал остается работоспособным в течение базы испытаний (330 ч. работы стенда или 5,94×10^7 циклов нагружения). Затем для величины $[h]$ по формуле (1) рассчитывается значение

критерия подобия π_1. Согласно первой теореме подобия, у явлений, подобных в физическом, математическом и т.д. смысле, можно найти определенные сочетания параметров, называемые критериями подобия, имеющие одинаковые значения [2]. Поэтому, используя полученное значение критерия подобия π_1, можно рассчитать максимально допустимую толщину полимерного слоя $[h]$ для подшипника любого типоразмера.

Следует отметить значительные затраты времени на исследование долговечности полимерных покрытий по методике Шубина. Для получения кривой усталости Веллера необходимо проводить испытания в течение 3 - 5 месяцев. Необходим новый метод ускоренных усталостных испытаний, в котором, используя тоже испытательное оборудование, можно будет получить в значительно более короткие сроки достоверную информацию о выносливости полимерных посадок при циклическом нагружении.

Цель исследований – разработать оригинальный метод испытаний на выносливость полимерных материалов на основе известных методов усталостных испытаний

Материалы и методы

Проведены патентный поиск и обзор литературных источников, по итогам которых отобраны наиболее приемлемые на наш взгляд методы ускоренных усталостных испытаний материалов конструкционного назначения.

Метод Локати

Основной критерий для определения предела выносливости при методе Локатти – полное разрушение образца, а также появление микро- или макротрещины в образце.

Метод Локати, главным образом, используется для образцов материал которых, имеюет физический предел выносливости, то есть на графике правая часть ветви кривой выносливости является прямой, параллельной оси абсцисс. Для материалов, не имеющих предела выносливости, могут быть подобраны режимы нагружения и параметры условных кривых выносливости таким образом, чтобы полученные методом Локати оценки были близки к условному пределу выносливости на заданной базе [14].

По этому методу определяют предел выносливости для 1 - 3 образцов. Далее усредняется предел выносливости при ступенчатом увеличении нагрузки. В основе метода лежит гипотеза Пальмгрена-Майнера о линейном характере накопления усталостного повреждения материала, согласно которой степень повреждения материала прямо пропорциональна отношению циклов нагружения n_i при данном уровне напряжения к долговечности N_i, при этом уровне напряжения в условиях постоянной амплитуды. Условие разрушения можно записать в виде

$$\sum_{1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1, \qquad (2)$$

где k – число уровней напряжений, при которых проводятся испытания.

Метод Локати относится к группе ускоренных методов оценки выносливости. По результатам испытаний образцов при ступенчатом нагружении до излома подсчитывается сумма относительных долговечностей $\sum \frac{n_i}{N_i}$, где значения долговечностей N принимаются из семейства предположительных кривых усталости *а – в* (рисунок 1).

Для построения условных (предполагаемых) кривых выносливости *а, б, в* координатах $\sigma_R - N$ или σ_R – Lg N проводят испытания в следующей последовательности. Кривую *а* строят по результатам испытаний, при которых 95 % образцов разрушилось, в этом случае предел выносливости будет σ_R^a. Кривую *б* строят по результатам испытаний, при которых 50 % образцов разрушилось, в этом случае предел выносливости будет $\sigma_R^б$. Кривую *в* строят по результатам испытаний, при которых 5 % образцов разрушилось, в этом случае пределом выносливости будет значение $\sigma_R^в$ [14].

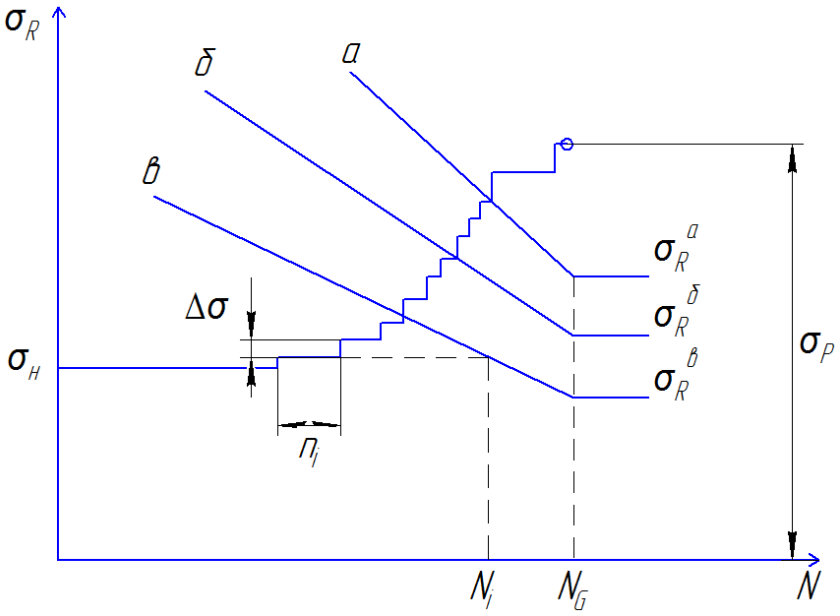


Рисунок 1 - Семейство прямых усталости по методу Локати

Программа испытаний образца должна обеспечить совпадение графика ступенчатого увеличения нагрузки с условными кривыми усталости. Экспериментальные данные обрабатывают по формуле (2) для каждой из трех условных кривых усталости, после проведения испытаний и разрушения образца. Результаты переносят на график в координатах σ_R по оси абсцисс и $\sum \frac{n_i}{N_i}$ по оси ординат (рисунок 2).

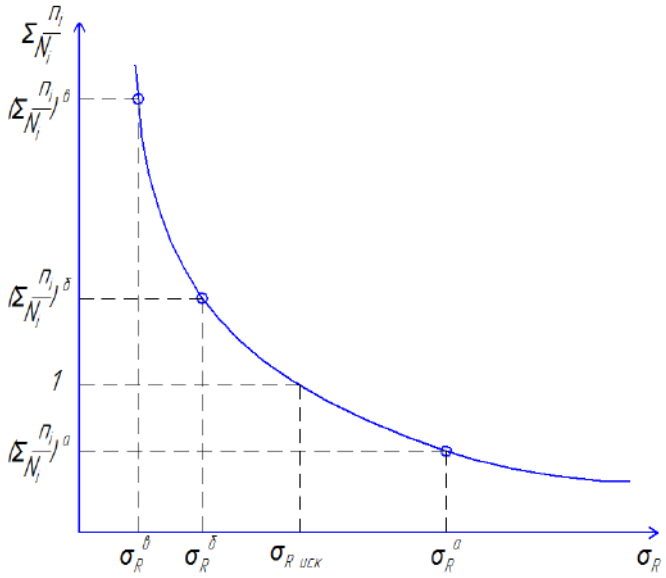


Рисунок 2 - График зависимости $\sum \frac{n_i}{N_i}$ от σ_R

Из точки, на оси ординат равной единице, проводим прямую до пересечения с графиком, опускаем перпендикуляр к оси абсцисс, это и будет искомым пределом выносливости $\sigma_{R\,\text{иск}}$.

Достоинства метода:

1. Достаточно удовлетворительная точность оценки предела выносливости — в пределах ±8%.

2. Большая экономия времени проведения исследований, при известных предположительных кривых усталости *а*, *б* и *в*.

Недостатки метода:

1. Линейный характер накопления усталостных повреждений материала справедлив не для всех исследуемых конструкционных материалов, т.е. $\sum_{1}^{k}\frac{n_i}{N_i}=a,\ a\neq 1$ (a = 0,2…5).

2. Высокая трудоёмкость метода, поскольку требуется большое количество испытаний и образцов для построения кривых усталости *а*, *б* и *в*.

Поэтому представляет научный интерес исследование методов малоцикловых усталостных испытаний.

Метод одного образца

Одним из методов ускоренной (малообразцовой) оценки усталостной прочности является метод одного образца, по которому испытывают на выносливость один образец сначала при напряжении ниже предела выносливости, затем при более высоких напряжениях на той же базе, и т. д., до тех пор, пока он не разрушится. Напряжение, предшествующее тому, при котором произошел излом, принимается за предел выносливости.

В качестве образцов используются детали, сопряжения, образцы круглого и прямоугольного профиля, и, кроме того, образцы с концентраторами напряжений. Ориентировочные значения базы испытания для некоторых объектов из стали: образцы материала – 2×10^6, несварные детали 10^6-5×10^6, сварные соединения 2×10^6-10^7, зубчатые передачи 3×10^6 [15].

Достоинства метода: для испытаний требуется только один образец.

Недостатки метода: в ходе повторных испытаний накапливается усталость, из-за которой найденный предел выносливости будет несколько меньше.

Метод Кудрявцева

Метод Кудрявцева, относящийся к методам ускоренной (малообразцовой) оценки усталостной прочности, основан на нахождении предела выносливости путём экстраполяции точек до пересечения с осью ординат. Испытывают два-четыре образца при $\sigma = 0{,}7\sigma_в$ и при близком к нему значению. Строится график, по оси абцисс откладывают значения σ^2, а по оси ординат значения $\sigma^2\text{Lg}N$ (рисунок 3).

Получают уравнение

$$\sigma^2 = A/(\text{Lg}N - B), \tag{3}$$

где A – отрезок прямой, отсекаемый линей графика по оси ординат; B – тангенс угла наклона прямой графика к оси абцисс.

В функции этой прямой вида $y = kx + b$, $A = b$, $B = k$.

База циклов нагружения в методе Кудрявцева составляет $N = 10^7$. В этом случае, по формуле (3) находят расчетное значение предела выносливости

$$\sigma_7 = \sqrt{A/(7-B)} \tag{4}$$

Затем определяют приближенный предел выносливости, близкий к экспериментальному

$$\sigma_{-1\text{пп}} = \frac{\sigma_7 - 5{,}4}{0{,}755}. \tag{5}$$

В заключении уточняют предел выносливости путем испытания образцов при напряжении $\sigma = \sigma_{-1\text{пп}}$.

Достоинства метода: ускорение испытаний и уменьшение количества опытов.

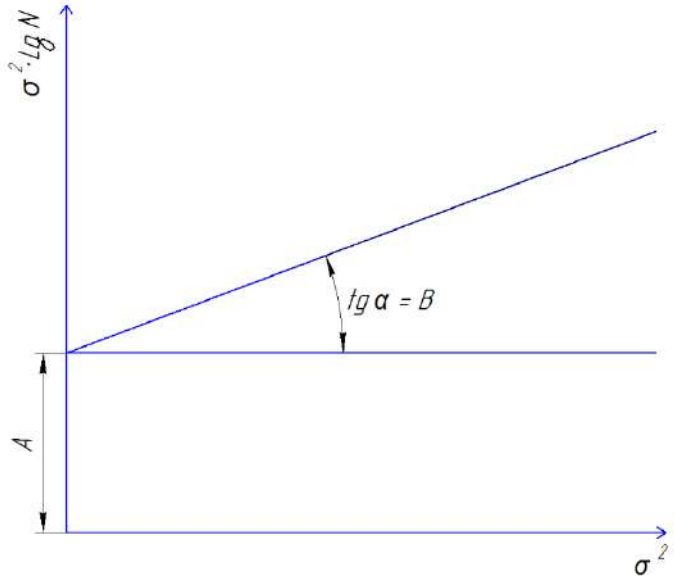


Рисунок 3 - Определение предела выносливости методом Кудрявцева

Недостатки метода: из-за уменьшения количества испытываемых образцов увеличивается погрешность в найденном пределе выносливости.

Метод Кравченко

По методу Кравченко предел выносливости определяют путём получения зависимостей (рисунок 4) напряжения цикла (ось ординат) от величины, обратной числу циклов нагружения (ось абцисс).

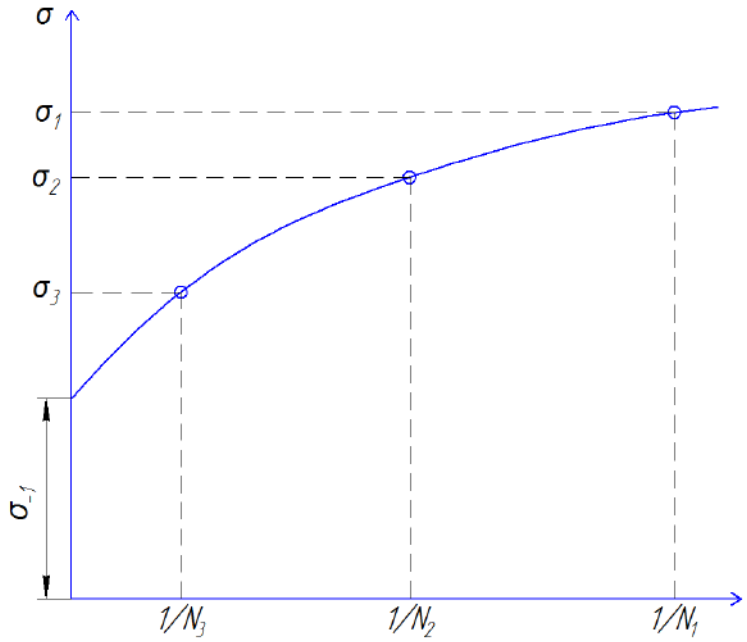


Рисунок 4 - Определение предела выносливости методом Кравченко

Это метод ускоренной (малообразцовой) оценки усталостной прочности материала. Испытывают 2 - 3 образца при напряжениях $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_{-1}$. Экстраполирут график по

найденным точкам. Предел выносливости определяется как координата точки пересечения кривой с осью ординат. Абсцисса этой точки равна нулю, что отвечает условию $N = \infty$, а $1/\infty = 0$, то есть стремится к бесконечности. Уточняют предел выносливости испытаниями одного-двух образцов при пределе выносливости, полученном экстраполяцией, то есть $\sigma = \sigma_{-1}$.

Достоинства метода: ускорение испытаний и уменьшение количества опытов.

Недостатки метода: из-за уменьшения количества испытываемых образцов увеличивается погрешность в установленном пределе выносливости.

Обсуждение полученных результатов

Метод Кравченко наиболее перспективен с точки зрения разработки на его основе нового метода ускоренных усталостных испытаний. Между пределом выносливости и толщиной эластомерного покрытия имеется сильно выраженная связь (рисунок 5). Чем меньше толщина покрытия, тем выше предел выносливости. Поэтому предлагается по оси ординат отмечать не напряжения цикла, а толщину эластомерного покрытия. Максимально допустимую толщину полимерной посадки следует определять экстраполяцией зависимости до пересечения ее с осью ординат.

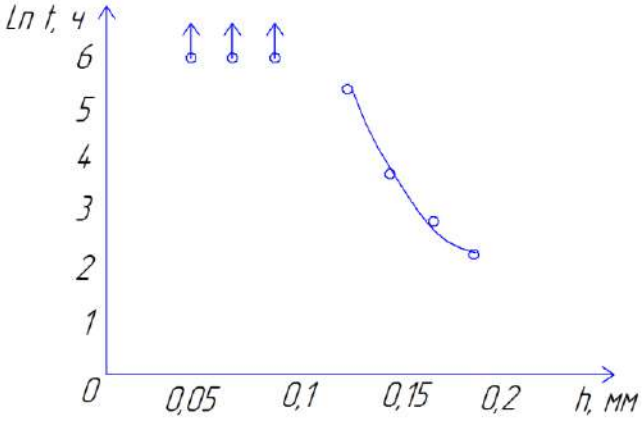


Рисунок 5 - Исследование долговечности по методу Шубина

Метод апробирован в ходе усталостных испытаний покрытий эластомера Ф-40С и нанокомпозита на его основе, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит».

На рисунке 6 изображены кривые Веллера, показывающие результаты исследования долговечности при циклическом нагружении посадок подшипников 209 при нагрузке в 20 кН. Испытывались покрытия из эластомера Ф-40С и нанокомпозита на его основе с различной толщиной полимерного.

Толщины покрытий, что находились в работоспособном состоянии по истечении времени базы испытаний, которые составляла $N = 5{,}94 \times 10^7$ циклов нагружения или в переводе на часы – 330 ч работы стенда, отмечены точками с продолжением в виде стрелок.

Данные по зависимости долговечности посадок из полимера и нанокомпозита от толщины полимерного покрытия представлены в таблице 1.

Долговечность посадок из нанокомпозита выше в 1,4-3,3 раза, чем из полимера при одной и той же толщине полимерного покрытия. Так, долговечность полимерных посадок с толщиной полимерного покрытия 0,20 мм наименьшая и составила 8 ч работы стенда, долговечность посадки из нанокомпозита в 3,3 раза больше и составила 29 ч.

Экстраполяция зависимостей по методу Кравченко до пересечения с осью ординат (рисунок 7) показала, что максимально допустимой толщиной покрытия эластомера Ф-40С является $[h] = 0{,}095$ мм, а для нанокомпозита этот параметр увеличился до $[h] = 0{,}115$ мм.

Контрольный эксперимент подтвердил объективность и корректность нового метода.

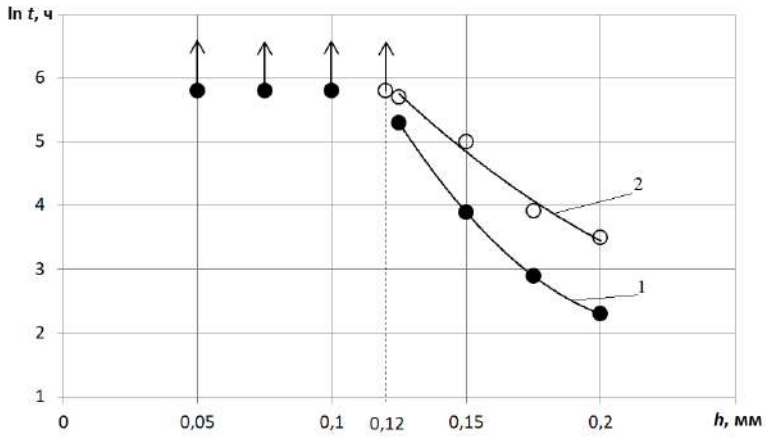
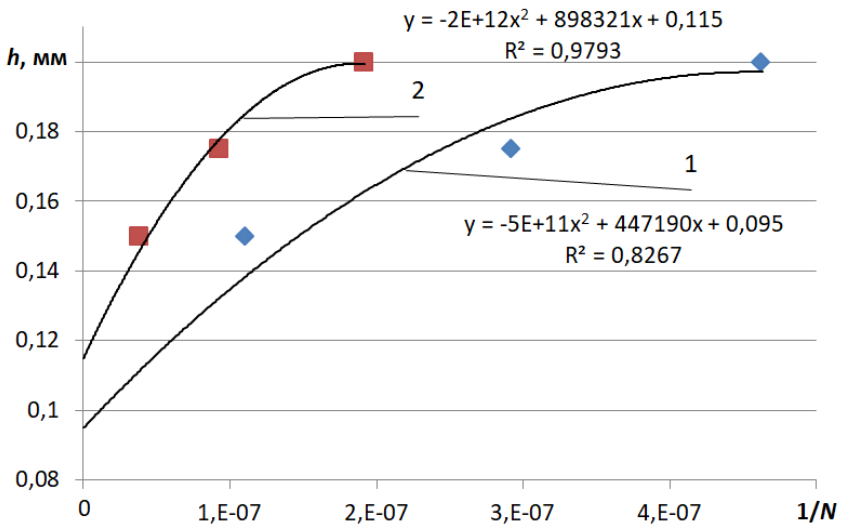


Рисунок 6 – График зависимости долговечности посадок подшипника 209 в корпусной детали от толщины полимерного покрытия *h* при радиальной циклической нагрузке в 20 кН: 1 – эластомер Ф-40С; 2 – нанокомпозит на основе эластомера Ф-40С

Таблица 1 - Долговечности посадок из полимера и нанокомпозита в зависимости от толщины покрытия

№ п/п	Толщина полимерного покрытия, мм	Долговечность посадки,час	
		Из полимера	Из нанокомпозита
1	0,200	8	29
2	0,175	25	60
3	0,150	50	146
4	0,125	210	300



по методу ЛГТУ: 1 – эластомер Ф-40С; 2 – нанокомпозит на основе эластомера Ф-40С

Рисунок 7 - График для определения максимально допустимой толщины полимерного покрытия

Посадки подшипников из эластомера Ф-40С нанокомпозита на его основе, с толщиной полимерного покрытия 0,10 и 0,12 мм, соответственно находились в работоспособном состоянии до завершения стендовых испытаний. Проворот наружного кольца подшипника в посадочном отверстии в течении базы стендовых испытаний 330 ч ($e^{5,8}$ = 330) не наблюдался. Поэтому нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40С рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях с диаметральным износом до 0,24 мм.

Заключение.

Таким образом предлагается новый метод ускоренных стендовых испытаний на выносливость полимерных материалов. Первоначально определяется долговечность полимерных посадок при циклическом нагружении с тремя заданными значениями толщины полимерного покрытия. По результатам стендовых испытаний строится зависимость толщины покрытия от величины обратной количеству циклов нагружения. Максимально допустимую толщину полимерной посадки следует определять экстраполяцией графической зависимости до пересечения ее с осью ординат (толщина покрытия). Затем рассчитывают по формуле (1) значение критерия подобия π_1. Формула (1) и значение критерия подобия π_1 позволяют рассчитать максимально допустимую толщину полимерной посадки для любого типоразмера подшипника качения.

Новый метод ускоренных усталостных испытаний полимерных посадок позволит многократно сократить объем и продолжительность экспериментальных исследований материалов.

Список литературы

1. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.

2. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32). С. 49-54.

3. Коломейченко, А.В. Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования / Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Логачёв В.Н., Титов Н.В. Строительные и дорожные машины. 2014. № 10. С. 16-21.

4. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

5. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

6. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

7. Ли, Р.И. Перспективный полимерный материал для восстановления корпусных деталей машин [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.В. Мироненко, М.Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2017. – №5. – С. 34-37.

8. Ли, Р.И. Модификация анаэробных герметиков металлическими наночастицами [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, В.А. Малюгин // Клеи. Герметики. Технологии – 2019. – №2. – С. 21-27.

9. Щетинин М.В. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивом Анатерм-105: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Мичуринск, 2008. – 146 с.

10. Шубин А.Г. Повышение долговечности посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных герметиком 6Ф: Автореф. дис.... канд. техн. наук. - М., 1980. – 16 с.

11. Бочаров, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.

12. Бутин, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.

13. Малюгин, В. А. Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокомпозитом на основе анаэробного герметика АН-111: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03: / Малюгин В. А. – Мичуринск, 2019. – 169 с.

14. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 306 с.

15. Глушкова М.В. Надёжность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций. Методические указания. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 27 с.

References

1. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Povyshenie stojkosti polimernyh kompozitov holodnogo otverzhdeniya k vozdejstviyu rabochih zhidkostej ispol'zovaniem nanomaterialov // Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal. 2015. № 1. S. 89–94.

2. ZHachkin S.YU., Pen'kov N.A., Mandrykin I.A., Belencov V.G. Intensifikaciya vosstanovleniya detalej sel'hozmashin dispersno-uprochnennym kompozitnym pokrytiem na osnove hroma // Innovacii v sel'skom hozyajstve. 2019. №3 (32). S. 49-54.

3. Kolomejchenko, A.V. Tekhnologiya vosstanovleniya s uprochneniem detalej mashin na osnove primeneniya mikrodugovogo oksidirovaniya / Kolomejchenko A.V., Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Logachyov V.N., Titov N.V. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2014. № 10. S. 16-21.

4. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

5. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

6. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

7. Li, R.I. Perspektivnyj polimernyj material dlya vosstanovleniya korpusnyh detalej mashin [Tekst] / R.I. Li, D.N. Psarev, A.V. Mironenko, M.R. Kiba // Klei. Germetiki. Tekhnologii – 2017. – №5. – S. 34-37.

8. Li, R.I. Modifikaciya anaerobnyh germetikov metallicheskimi nanochasticami [Tekst] / R.I. Li, D.N. Psarev, V.A. Malyugin // Klei. Germetiki. Tekhnologii – 2019. – №2. – S. 21-27.

9. SHCHetinin M.V. Vosstanovlenie nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki adgezivom Anaterm-105: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03. – Michurinsk, 2008. – 146 s.

10. SHubin A.G. Povyshenie dolgovechnosti posadochnyh otverstij korpusnyh detalej sel'skohozyajstvennoj tekhniki, vosstanovlennyh germetikom 6F: Avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk. - M., 1980. – 16 s.

11. Bocharov, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki adgezivami, napolnennymi dispersnymi metallicheskimi poroshkami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Bocharov A. V. – Michurinsk, 2009. – 150 s.

12. Butin, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki polimer-polimernymi kompoziciyami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Butin A. V. – Michurinsk, 2012. – 127 s.

13. Malyugin, V. A. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kacheniya avtomobilej nanokompozitom na osnove anaerobnogo germetika AN-111: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Malyugin V. A. – Michurinsk, 2019. – 169 s.

14. SHkol'nik L.M. Metodika ustalostnyh ispytanij: spravochnik. – M.: Metallurgiya, 1978. – 306 s.

15. Glushkova M.V. Nadyozhnost' v tekhnike. Metody uskorennyh ispytanij na ustalost' dlya ocenki predelov vynoslivosti materialov, elementov mashin i konstrukcij. Metodicheskie ukazaniya. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1990. – 27 s.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ли Роман Иннакентьевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Псарев Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Киба Мария Романовна – кандидат технических наук, ассистент, ФГБОУ ВО «СанктПетербургский государственный горный университет», Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Мельников Антон Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Author credentials
Affiliations

Lee Roman – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: romanlee@list.ru.

Psarev Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Michurinsk State Agrarian University, Russia, Michurinsk, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Kiba Maria – Candidate of Technical Sciences, assistant, St. Petersburg State Mining University, Russia, St. Petersburg, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Melnikov Anton – post-graduate student, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: reks1r@yandex.ru

Поступила в редакцию (Received): 24.05.2022 Принята к публикации (Accepted): 27.05.2022