

– Луганск: СХУ им. Даля, 2006. – 408с. **6. Бабичев Д.Т., Сторчак М.Г., Бабичев Д.А.** Основы синтеза профилей зубьев цилиндрических передач, обладающих повышенной контактной прочностью // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": Збірник наукових праць. Серія "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – №36. – С.10-19. **7. Heisel, U.; Danilchenko, Yu.; Pasternak, S.; Storchak, M., Schaal, M.** Modellieren des Verzahns mit Scheibenwerkzeugen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2010), Nr.7-8/2010, S.649-654. **8. Frihe, T.** Berechnung und Minimierung der Zahnfußspannung von Standard- und LowLoss-Verzahnungen. Dissertation. TU München 2012.

*Поступила в редколлегию 30.04.2013*

УДК 621.83

**О синтезе переходной кривой во впадине цилиндрических зубчатых колес и червяков / Д.Т. Бабичев, А.В. Кривошея, М.Г. Сторчаков, В.А. Голованев, А.Ю. Тайсин** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №41(1014). – С.7-14. – Бібліогр.: 8 назв.

Розглянута геометрія перехідних кривих у вигляді дуг еліпсів, що стосуються кіл западин одною зі своїх вершин. Побудовані математичні моделі, що описують геометрію перехідних кривих до радіусів кривизни включно. Проведено дослідження перехідних кривих, приведені графіки, що відображають їх геометричні властивості. Дайни номограми для вибору раціональних параметрів у вигляді дуг еліпсів і кіл.

**Ключові слова:** перехідна крива, колесо зубчате циліндрове, черв'як циліндровий.

Discerned geometry of fillet curves in view as elliptic arc, what touch a circle of dedendum with one of peak. Build mathematical models for description geometry of fillet curves up to radius of curvature included. Realized research of fillet curve, presented diagrams that shown its geometrical attributes. Depicted nomograms of choosing rational parameters of fillet curves in view as elliptic arcs and circles.

**Keywords:** fillet curve, cylindrical gear, cylindrical worm.

УДК 624.011.078.001.4

**В.Л. БАСИНЮК**, д.т.н., доц., директор НТЦ ОИМ НАН Беларуси, Минск;  
**В.Е. СТАРЖИНСКИЙ**, д.т.н., доц., главный научный сотрудник  
ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель;  
**Е.И. МАРДОСЕВИЧ**, к.т.н., заведующий сектором ОИМ НАН Беларуси;  
**А.А. ГЛАЗУНОВА**, научный сотрудник ОИМ НАН Беларуси;  
**С.С. ПАПИНА**, начальник отдела УП "КБТЭМ-СО" ГНПО "Планар",  
Минск, Беларусь

## **СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НИЗКИХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Рассмотрена методика проведения сертификационных ускоренных испытаний пар трения с полимерными композиционными материалами в лабораторных условиях при повышенных до 375K и пониженных до минус 173K температурах.

**Ключевые слова:** методика, композиционные материалы, температура.

**Постановка задачи.** Полимерные композиционные материалы все чаще находят широкое применение в передачах зацеплением мехатронных систем различного назначения. В ряде случаев они могут работать без смазки в широком диапазоне температур; их применение позволяет снизить массу приборов и механизмов в 2 и более раз.

Основной задачей исследований являлась разработка методики для проведения сертификационных ускоренных испытаний пар трения с полимерными композиционными материалами в лабораторных условиях при пони-

© В.Л. Басинюк, В.С. Старжинский, О.І. Мардосевич, Г.О. Глазунова, С.С. Папіна, 2013

женных до минус 173К и повышенных до 373К температурах и скоростях скольжения от 0,01м/с до 20м/с. В результате ее реализации планировалось получить аналитическую зависимость коэффициента трения скольжения и интенсивности изнашивания в заданном диапазоне температур охлаждения и нагрева пары трения, скоростей скольжения и контактных давлений.

**Анализ литературы.** Анализ методических подходов [1-6], используемых при триботехнических испытаниях пар трения скольжения показал, что, несмотря на значительное число новых технических решений в этой области, возможности сокращения длительности и трудоемкости их проведения при исследованиях полимерных композитов остаются крайне ограниченными.

**Цель статьи.** Целью нашей работы являлась разработка методики организации и проведения ускоренных сертификационных триботехнических испытаний пар трения "композит на основе полимера – сталь типа ШХ15 с твердостью HRC62-65 и шероховатостью рабочих поверхностей менее 0,16мкм", ориентированных на использование в передачах зацеплением, подшипниках и направляющих скольжения техники для экстремальных условий.

**Методика исследований.** В предлагаемом подходе ускорение испытаний достигается в результате одновременного испытания нескольких образцов с применением программно-управляемых приводных систем, автоматизированных средств управления режимами испытаний, съемом и обработкой диагностических данных и использования при организации и проведении испытаний метода планирования эксперимента.

Ускоренные сертификационные испытания проводятся при минимальном и максимальном значениях требуемого температурного диапазона использования полимерного материала, скоростей скольжения и контактных напряжений.

В качестве исходных параметров при выборе режимов ускоренных сертификационных испытаний используются:

- нормальная температура  $T_0$ ;
- минимальная  $T_{\min}$  и максимальная  $T_{\max}$  температуры соответственно охлаждения и нагрева пары трения, определяемые условиями эксплуатации или техническими условиями на сертифицируемые пару трения или иными требованиями, определяемыми в установленном порядке;
- минимальная  $V_{\min}$  и максимальная  $V_{\max}$  скорости скольжения, определяемые условиями эксплуатации или техническими условиями на сертифицируемый материал или иными требованиями, определяемыми в установленном порядке;
- минимальное  $p_{\min}$  и максимальное  $p_{\max}$  контактное давление, определяемые условиями эксплуатации или техническими условиями на сертифицируемый материал или иными требованиями, определяемыми в установленном порядке.

По результатам ускоренных сертификационных испытаний определяют коэффициенты трения скольжения и интенсивность изнашивания испытываемых пар трения скольжения, включающих композиционные полимерные материалы.

При реализации методики определяются зависимости коэффициентов трения скольжения и износостойкости от температуры  $T$  (К), скорости скольжения  $V$  (м/с) и контактных давлений  $p$  (МПа) в требуемых диапазонах изменения этих параметров, имеющие вид:

$$f = f_0 + a_{fT} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} + a_{fV} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + a_{fp} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} +$$

$$+ a_{fTV} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + a_{fTp} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} +$$

$$+ a_{fVp} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + a_{fTVp} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} ; \quad (1)$$

$$i = i_0 + b_{iT} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} + b_{iV} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + b_{ip} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} +$$

$$+ b_{iTV} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + b_{iTp} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} +$$

$$+ b_{iVp} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} + b_{iTVp} \frac{T - T_0}{T_{\max} + T_{\min}} \frac{V - V_c}{V_{\max} + V_{\min}} \frac{p - p_c}{p_{\max} + p_{\min}} , \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения испытываемой пары трения при текущем значении скорости скольжения, температуре и контактном давлении в рассматриваемых диапазонах изменения данных параметров;  $f_0$  – среднее значение коэффициента трения скольжения испытываемой пары трения при среднем значении скорости скольжения, средней температуре и среднем значении контактного давления;  $i$  – интенсивность изнашивания испытываемой пары трения при текущем значении скорости скольжения, температуре и контактном давлении в рассматриваемых диапазонах изменения данных параметров, мкм/м;  $i_0$  – среднее значение интенсивности изнашивания испытываемой пары трения при среднем значении скорости скольжения, нормальной температуре и среднем значении контактного давления, мкм/м;  $a_{fT}, a_{fV}, a_{fp}, a_{fTV}, a_{fTp}, a_{fVp}, a_{fTVp}$  – коэффициенты, определяемые при исследованиях коэффициентов трения по методике обработки данных при планировании эксперимента и имеющие размерности, соответственно  $K^{-1} \cdot c/m$ ,  $MПа^{-1}$ ,  $K^{-1} \cdot c/m$ ,  $K^{-1} \cdot MПа^{-1}$ ,  $MПа^{-1} \cdot c/m$ ,  $K^{-1} \cdot MПа^{-1} \cdot c/m$ ;  $b_{iT}, b_{iV}, b_{ip}, b_{iTV}, b_{iTp}, b_{iVp}, b_{iTVp}$  – коэффициенты, определяемые при исследованиях износостойкости по методике обработки данных при планировании эксперимента и имеющие размерности, соответственно  $K^{-1} \cdot мкм/м$ ,  $c \cdot мкм/м^2$ ,  $MПа^{-1} \cdot мкм/м$ ,  $K^{-1} \cdot c \cdot мкм/м^2$ ,  $K^{-1} \cdot MПа^{-1} \cdot мкм/м$ ,  $MПа^{-1} \cdot c \cdot мкм/м^2$ ,  $K^{-1} \cdot MПа^{-1} \cdot c \cdot мкм/м^2$ .

Для проведения испытаний может быть использован стендовый комплекс, схема которого показана на рисунке 1.

Управление процессом проведения испытаний, съемом и обработкой диагностических данных осуществляется от ПЭВМ с многоканальным АЦП через специальный микропроцессорный контрольно-силовой модуль, позволяющий обеспечить регулируемую скорость скольжения образцов и температуру нагрева или охлаждения в приведенном выше диапазоне значений, а также регистрацию усилий сопротивления скольжения с определением силы и коэффициента трения и интенсивности изнашивания образцов.

Перед проведением испытаний, исходя из значений  $p_{\min}$  и  $p_{\max}$  осуществляется расчет радиусов кривизны  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  образцов из каждого испытываемого композита на основе полимерного материала.

При подготовке к ускоренным испытаниям в соответствии с методикой

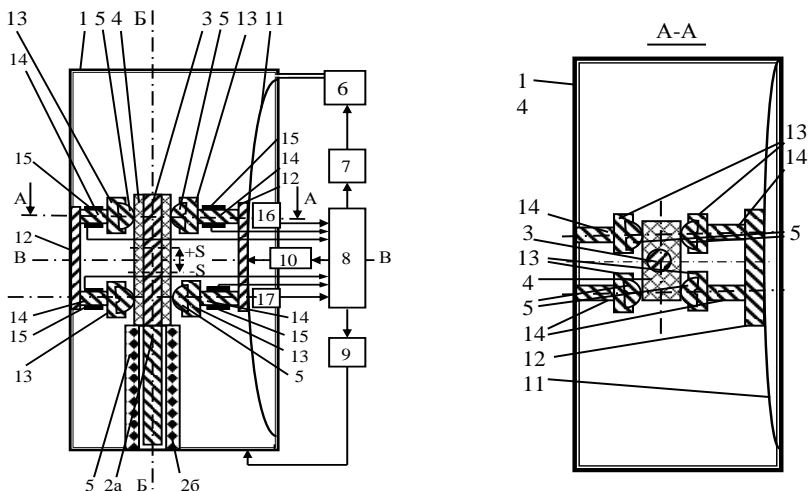


Рисунок 1 – Схема устройства для проведения испытаний в условиях вакуума:  
 1 – вакуумная камера; 2а, 2б – статор и ротор коилл-двигателя; 3 – цилиндрический шток; 4 – контртелу;  
 5 – испытываемый образец; 6 – вакуумный насос; 7 – блок управления вакуумным насосом (БУВН);  
 8 – программируемый модуль; 9 – блок управления коилл-двигателем (БУК); 10 – блок управления  
 нагружением (БУН); трибоспрязжений "образец 5 – контртело 4"; 11 – упруго-податливая диафрагма;  
 12 – жесткая опорная пластина; 13 – державка; 14 – упруго деформируемая пластина; 15 – тензодатчи-  
 ки, соединенные по мостовой схеме; 16,17 – бесконтактные измерители малых перемещений

планирования эксперимента составляется таблица 1 уровней варьирования параметров и их кодовых обозначений.

Формируется матрица планирования ускоренных сертификационных испытаний, приведенная в таблице 2. Образцы выставляют по опорной поверхности и закрепляют в державки; в вакуумной камере создается требуемое разряжение. Проводятся предварительные испытания при нормальной температуре  $(296 \pm 2) \text{K}$   $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ , минимальных и максимальных скоростях скольжения.

**Проведение испытаний.** При проведении испытаний испытываемые образцы охлаждаются до температуры  $T_{\min}$ , после чего со скоростями  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  осуществляется цикл испытаний с определением коэффициентов трения и интенсивности изнашивания, после чего образцы нагреваются до максимальной температуры  $T_{\max}$ , и также со скоростями  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$  осуществляется цикл испытаний с определением коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Из полученных данных результатов формируются файлы данных.

Таблица 1 – Уровни варьирования параметров и их кодовых обозначений

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	$T/T_0, (T, \text{K})$	$V/V_{cs} (V, \text{м/с})$	$p/p_c (p, \text{МПа})$
		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	0	$0,5(T_{\max} + T_{\min})$	$0,5(V_{\max} + V_{\min})$	$0,5(p_{\max} + p_{\min})$
Интервал варьирования	$\Delta X_i$	$T_{\max} - T_{\min}$	$V_{\max} - V_{\min}$	$p_{\max} - p_{\min}$
Верхний уровень	+1	$(T_{\max} - T_{\min})/$	$(V_{\max} - V_{\min})/$	$(p_{\max} - p_{\min})/$
		$(T_{\max} + T_{\min})$	$(V_{\max} + V_{\min})$	$(p_{\max} + p_{\min})$
Нижний уровень	-1	$(T_{\min} - T_{\max})/$	$(V_{\min} - V_{\max})/$	$(p_{\min} - p_{\max})/$
		$(T_{\min} + T_{\min})$	$(V_{\min} + V_{\min})$	$(p_{\min} + p_{\min})$

Таблица 2 – Матрица планирования ускоренных сертификационных испытаний

№ группы	№ эксп.	Режимы испытаний			Обозначение
		$T/T_0$ , (Т, К)	$V/V_c$ , (V, м/с)	$p/p_c$ , (p, МПа)	
I	1	$T_{min}$	$V_{min}$	$p_{min}$	–1
	2	$T_{min}$	$V_{min}$	$p_{max}$	+1
	3	$T_{min}$	$V_{max}$	$p_{min}$	+1
	4	$T_{min}$	$V_{max}$	$p_{max}$	–1
II	5	$T_{max}$	$V_{min}$	$p_{min}$	+1
	6	$T_{max}$	$V_{min}$	$p_{max}$	–1
	7	$T_{max}$	$V_{max}$	$p_{min}$	–1
	8	$T_{max}$	$V_{max}$	$p_{max}$	+1

**Результаты испытаний.** По результатам испытаний по методике обработки данных при планирования эксперимента рассчитываются коэффициенты зависимостей (1) и (2). С помощью  $t$ -критерия (критерия Стьюдента) осуществляется проверка статистической значимости коэффициентов уравнений (1) и (2). С помощью  $F$ -критерия (критерия Фишера) оценивается адекватность принятой модели в целом.

**Выводы.** Разработанная методика позволяет проводить ускоренные сертификационные испытания полимерных материалов для машиностроительных конструкций и приборов, таких как зубчатые передачи, подшипники скольжения и направляющие, работающие в широком диапазоне температур при различных нагрузочных режимах. Применение методики позволит ускорить и получить достоверные данные о характеристиках полимерных материалов, автоматизировать процесс исследования их триботехнических и эксплуатационных свойств.

**Список литературы:** 1. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин, М.М. Бородулин и др.; Под ред. А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 1980. – 208с. 2. ДИН 50100-78, DE. Испытания материалов на усталостную прочность. Термины и определения, условные обозначения, проведение испытаний, оценка результатов. Взамен ДИН 50100-53; введ. 02.78 Издано в: [Б.м., 1978]. – 36с. 3. Гильман А.А. Механические испытания полимерных материалов. Учебное пособие. – СГТУГод, 2006. 4. Гурова Т.А. Технический анализ и контроль производства пластмасс / Т.А. Гурова. – М.: Высшая школа, 1980. – 200с. 5. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, В.В. Коврига. – М.: "Химия", 1978. – 336с. 6. ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования. – Введен 01.01.1970. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 27с.

Поступила в редколлегию 26.04.2013

УДК 624.011.078.001.4

**Сертификационные испытания композиционных материалов при низких и повышенных температурах / В.Л. Басинюк, В.Е. Старжинский, Е.И. Мардосевич, А.А. Глазунова, С.С. Папина // Вісник НТУ "ХПІ".** Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №41(1014). – С.14-18. – Бібліогр.: 6 назв.

Розглянута методика проведення сертифікаційних прискорених випробувань пар тертя з полімерними композиційними матеріалами в лабораторних умовах при підвищених до 375К і знижених до мінус 173К температурах.

**Ключові слова:** методика, композиційні матеріали, температура.

Methodology of realization of certification speed-up tests of pairs of friction is considered with polymeric composition materials in laboratory terms at enhance able to 375K and lowered to minus 173K temperatures.

**Keywords:** methodology, composition materials, temperature.