

УДК 621.833.031

А.Г. ПРИЙМАКОВ, канд. техн. наук, зав. каф. прикладной механики, Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры, **А.В. УСТИНЕНКО**, канд. техн. наук, доц. каф. ТММиСАПР, **Г.А. ПРИЙМАКОВ**, аспирант каф. ДПМ, НТУ „ХПИ”

СИСТЕМНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗУБЧАТЫХ ПАР В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Розроблено теоретичні та експериментальні передумови прогнозування працездатності трибологічних систем типу зубчастих передач. Системно досліджено експериментальний бік цієї науково-технічної проблеми.

Theoretical and experimental prognostication pre-conditions of tribologic systems capacity are developed as gearings. The experimental side of this scientific and technical problem was system research.

Введение. В процессе эксплуатации трибологических систем типа силовых зубчатых передач возникает проблема прогнозирования их работоспособности как некоторого интегрального показателя, включающего в себя критерии прочности, выносливости, износостойкости, надежности, остаточного ресурса и др. Рассмотрение критериев по отдельности не позволяет объектив-

но учитывать многофакторность их влияния, особенно в условиях неопределенности, свойственной эксплуатации силовых зубчатых передач в реальных условиях. Поэтому необходимо применять системный подход к прогнозированию их работоспособности в процессе эксплуатации, например, при выборе допускаемых контактных напряжений σ_{HP} .

Анализ литературных источников [1-12] показывает, что эта научно-техническая проблема в такой постановке решается впервые.

Целью статьи является создание методологии системного подхода к прогнозированию работоспособности силовых зубчатых передач в процессе эксплуатации с учетом реологии и анизотропии свойств контактирующих пар, самоорганизации зубчатой пары как замкнутой трибологической системы (ТС), интенсивности износа J_n и меры повреждаемости D пары в процессе эксплуатации.

1. Экспериментальные исследования изнашивания зубчатых пар. Теоретические предпосылки системного подхода к прогнозированию работоспособности достаточно полно изложены в работах [1-3], однако возникает необходимость в их экспериментальном подтверждении.

В ходе исследования наиболее типовых силовых зубчатых пар (например, пары Сталь 30ХГСА – Сталь 40Х) на экспериментальном трибологическом компьютеризированном центре "ТК", созданном в научно-технической лаборатории кафедры №207 ХИ ВВС им. И. Кожедуба [4], получены следующие результаты (рис. 1, табл. 1, 2).

В табл. 3 и 4 приведены данные по физико-механическим характеристикам поверхностных слоев (ПС) пар трения.

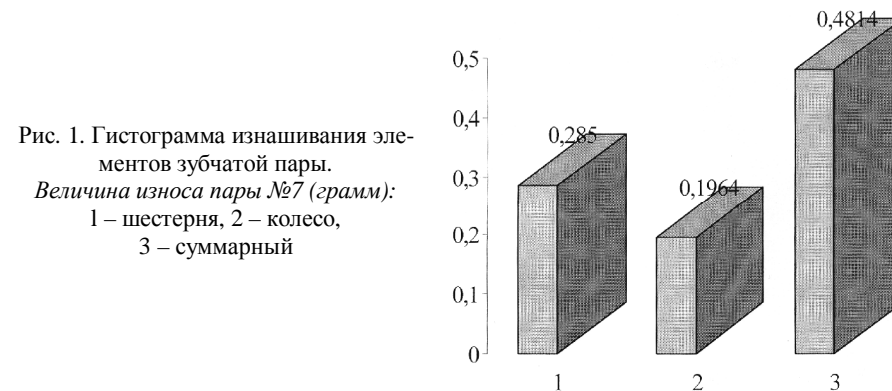


Рис. 1. Гистограмма изнашивания элементов зубчатой пары. Величина износа пары №7 (грамм): 1 – шестерня, 2 – колесо, 3 – суммарный

Таблица 1

Материалы пары трения

Деталь	Наименование	Материал	Твердость, НВ
1. Подвижная деталь – ролик	Шестерня	Сталь 30ХГСА, ГОСТ 4543-71	330...390
2. Подвижная деталь – колесико	Колесо	Сталь 40Х, ГОСТ 1050-84	260...310

Таблица 2

Основные трибологические характеристики при достижении базы испытаний N_0

№ пары трения	Износ колодки, г		Износ ролика, г		Суммарный износ пары, г	$M_{тр\ ср}$, Н·м	Температура поверхности ср., °С
	Н45	0,3388	П45	0,1821			
7. Шестерня – колесо	Н47	0,2960	П47	0,2266	0,4226	1,7	67
	Н54	0,2203	П48	0,1804	0,4007	1,7	67
	$H_{ср}$	0,2850	$P_{ср}$	0,1964	0,4814	1,7	67

Шестерня (ролик)

до испытаний

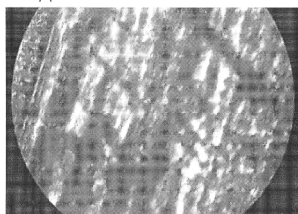


после испытаний



Колесо (колодка)

до испытаний



после испытаний



Рис. 2. Микрофотографии поверхностей трения образцов

Таблица 3

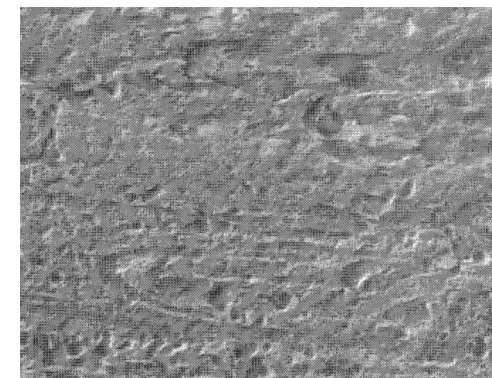
Микротвердости поверхностей трения

Микротвердость поверхностей пары трения №7, $H_{ср}$, МПа	Колодка	Ролик
До испытаний	3100	3200
После испытаний	5080	5810

Таблица 4

Напряжения в поверхностном слое

Напряжение в поверхностном слое пары трения №7а, σ , МПа	Колодка	Ролик
До испытаний	600	620
После испытаний	980	1120

Рис. 3. Микрофотография (РЭМ) поверхности трения образца №7, $\times 740$

На рис. 2, 3 и в табл. 5 приведены данные по микрогеометрии поверхностей трения. Содержание химических элементов в поверхностном слое деталей, подвергавшихся испытаниям, приведено в табл. 6. Результаты определения анизотропии структурного состояния поверхностей трения зубчатой пары приведены в табл. 7 и на рис. 4.

Таблица 5

Шероховатости поверхностей трения

Шероховатость, R_a	Колодка	Ролик
До испытаний	1,2	1,14
После испытаний	3,0	1,02

Таблица 6

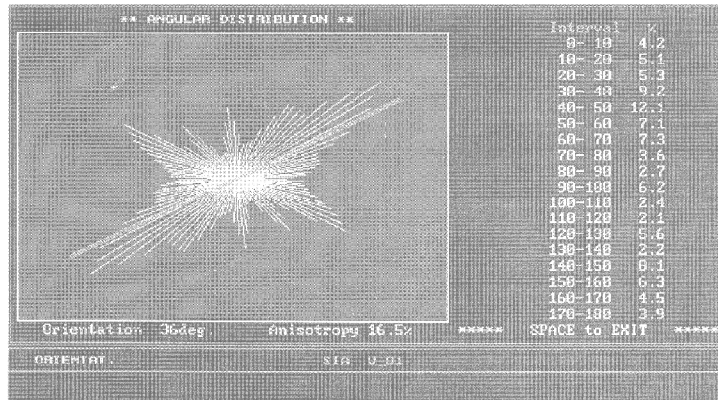
Содержание химических элементов в поверхностном слое материалов, которые подвержены сравнительному анализу

Содержание химических элементов, %			Пара: №7 Деталь: шестерня (ролик) Материал: Сталь 30 ХГСА ГОСТ 4543-71	
			До испытаний	После испытаний
1	С	углерод	0,32...0,39	-
2	Si	кремний	1,1...1,4	0,956
3	Mn	марганец	0,8...1,1	1,137
4	Cr	хром	1,1...1,4	1,184

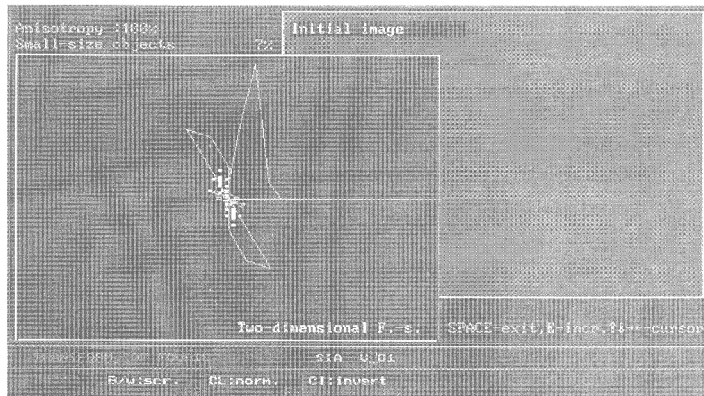
Таблица 7

Определение коэрцитивной силы (коррелянт тензора эквивалентных напряжений)

Коэрцитивная сила $F_{кп}$, А/см	Шестерня (ролик)	Колесо (колодка)
До испытаний	8,4	7,1
После испытаний	8,8	9,2



а



б

Рис. 4. Фурье-анализ структурного состояния поверхности трения образца №7:
 а – анализ ориентации блоков и анизотропия структурных составляющих;
 б – обобщенный анализ сложности структурного состояния (уровня разнообразия составляющих структуры)

2. Определение эквивалентных действующих напряжений в поверхностном слое зубьев шестерни и колеса. После выполнения всех экспериментальных исследований контактного взаимодействия зубчатой пары под рабочей нагрузкой появляется возможность найти по известным зависимостям [1-3] тензор и численные значения эквивалентных напряжений в поверхностных слоях зубьев. Эти напряжения, по сути, и определяют допускаемые контактные напряжения $\sigma_{НР}$. Отметим, что Фурье-анализ дает возможность определить параметры Ляме в известных соотношениях теории упругости [9, 10] по С.П. Тимошенко, позволяющих полностью оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) силовой зубчатой пары в пределах упругости и даже перейти в область динамической ползучести.

Особо следует отметить, что НДС трибосистемы хорошо коррелируется измерением коэциртивной силы поверхностного слоя $F_{кп}$, [А/см]. Хотя этот метод до сих пор не стандартизован в нашей стране, он весьма положительно зарекомендовал себя в зарубежных и отечественных исследованиях [11, 12].

Выводы. Системное экспериментальное исследование зубчатых пар должно включать в себя: определение основных трибологических характеристик материалов пары для базы испытаний N_0 наиболее нагруженного элемента (шестерни); определение физико-механических характеристик поверхностных слоев пары; определение микрогеометрии поверхностей трения; химический анализ ПС; определение анизотропии структурного состояния поверхностей трения, и, в результате, определение действующих эквивалентных напряжений в ПС, а по ним – определение объективных значений $\sigma_{НР}$.

Список литературы: 1. Приймаков О.Г., Бобровицкий О.В. Математичне моделювання процесу функціонування інтегрального показника працездатності авіаційних матеріалів // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2004. – Вып.24. – С.136-141. 2. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О. Працездатність деталей авіаційної техніки з точки зору термодинаміки // Вестник науки и техники. – 2003. – Вып.4. – С.21-28. 3. Приймаков А.Г., Устиненко А.В. К вопросу о рациональном выборе допускаемых напряжений в машиностроении // Механіка та машинобудування. – 2004. – №2. – С.57-62. 4. Приймаков О.Г., Чотій Л.Ю. Комплекс обладнання для трибологічних досліджень // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2004. – Вып.38(3). – С.77-84. 5. Приймаков А.Г., Стадниченко Н.Г. О механизмах структурной приспособляемости при абразивном изнашивании материалов // Проблемы трибологии: Междунар. научн. журнал. – 2004. – №2. – С.113-121. 6. Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Приймаков Г.А. Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и его устойчивости на поверхностях трения при определении допускаемых напряжений // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Проблемы механического привода. – Харьков, 2005. – №40. – С.65-77. 7. Приймаков О.Г. Основи технічних знань: В 2 т. – Харків: Скорпіон, 2006. – Т.1. – 248с. – Т.2. – 216с. 8. Приймаков А.Г., Устиненко А.В. Выбор допускаемых напряжений в условиях абразивного изнашивания // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – Харьков, 2006. – №32. – С.129-137. 9. Приймаков О.Г., Устиненко О.В., Стадниченко В.М. Математичне моделювання процесів реології та самовпорядкування в зубчастих передачах // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харьков, 2007. – №3. – С.137-145. 10. Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Приймаков Г.А. Аналітичне визначення тріщиностійкості зубчастих пар с позицій синергетики // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Проблемы механического привода. – Харьков, 2007. – №21. – С.76-86. 11. Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Стадниченко В.Н. О стойкости трибологических свойств термонапряженных зубчатых передач // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганск, 2007. – №9(115). – Ч.1. – С.184-187. 12. Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Приймаков Г.А. Напряженно-деформированное состояние зубчатых передач с позиций термоконтактного деформирования в упруго-пластической области и в условиях ползучести // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – Харьков, 2007. – №38. – С.137-141.

Поступила в редколлегию 09.10.2008