

СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Овчинников Е.В. (УО ГрГУ им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь)

Аннотация. Проведены исследования структуры и физико-механических характеристик композиционных покрытий сформированных на базе фторорганических соединений, модифицированных ультрадисперсными частицами алмазосодержащего графита (УДАГ). Предложена модель формирования нанокомпозиционного покрытия, при введении в него нанодисперсных частиц углерода. Проведена оценка применимости уравнений используемых для определения размеров и модифицирующего влияния наночастиц на близлежащие слои полимерной или олигомерной матрицы в трехмерных объектах, для случая, когда свойства объекта зависят от их размера в одном из направлений (толщины пленки или покрытия). Установлено синергическое влияние типа подложки, структуры фторсодержащих олигомеров и ультрадисперсных частиц алмазосодержащего графита на физико-механические характеристики формируемых покрытий.

Ключевые слова: структура, алмазоподобные соединения, фторсодержащие пленки, микротвердость.

1. Введение.

В настоящее время особый интерес представляют тонкопленочные покрытия различного функционального назначения, среди которых перспективное применение в различных отраслях промышленности имеют покрытия на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров [1-2]. Такие покрытия, толщина которых не превышает 5 мкм, удается получать с помощью основных технологических методик: плазмохимической из активной газовой фазы, ротапринтной и растворной, благодаря разработке растворимых фракций фторсодержащих олигомеров. Особый интерес вызывают покрытия, сформированные по растворной технологии, не требующей специального дорогостоящего оборудования. Данные покрытия обладают комплексом уникальных эксплуатационных характеристик, т. к. молекулы олигомеров сочетают в себе высокую химическую стойкость (связи C–F), активность (химически активные концевые функциональные группы), гибкость и подвижность (наличие в структуре молекулярной цепи эфирных связей и сравнительно невысокая молекулярная масса макромолекулы) [1]. Традиционным подходом получения тонкопленочных покрытий является обработка твердой подложки в 1-2 % растворе в хладоне-137 фторсодержащих олигомеров (ФСО), имеющих общую структурную формулу R_fR_n (R_f -фторсодержащий радикал, R_n - концевая группа). Применяемые олигомеры имеют различную молекулярную массу от 2000 до 5000 ед. и строение концевых групп [3]

В работах [1,3,4] основное внимание в ходе исследований уделяли “Фолеоксам” марок Ф-1 и Ф-14, резко отличающихся по полярности, обусловленной концевыми группами $-COOH$ и $-CF_3$. В качестве подложек использовали медь М-1, алюминий А99, сталь (45, 08kp, ШХ-15), а также композиционное многослойное покрытие на основе нитрида титана. Интерес к такого рода покрытиям вызван их высокой износостойкостью, обусловленную тем, что они состоят из твердого подслоя, воспринимающего основную нагрузку и сравнительно мягкого поверхностного слоя с минимальным сопротивлением сдвигу и способного к многократному передеформированию без разрушения.

Целью данной работы является изучение структуры физико-механических характеристик нанокомпозиционных тонкослойных покрытий, сформированных из жидкой фазы и модифицированных нанодисперсными частицами различной активности.

Для получения тонкопленочных покрытий применяли 1-2 % раствор в хладоне-137 фторсодержащих олигомеров (ФСО), выпускаемых под торговой маркой «Фолеокс», имеющих общую структурную формулу R_f-R_n (R_f - фторсодержащий радикал, R_n - концевая группа). Исследуемые олигомеры имели различную молекулярную массу от 2 до 5 тыс. единиц и строение концевых групп [3]. Основное внимание в ходе исследований уделяли олигомерам марок Ф1 и Ф14, резко отличающихся по полярности, обусловленной концевыми группами – COOH и CF₃. В качестве подложек использовали медь М-1, сталь 08kp, стекло, алюминий А99. Модифицирование фторсодержащих олигомеров проводили в жидкой фазе, ультрадисперсными кластерами алмазосодержащего графита (УДАГ). Данный модификатор получают по эксплозивной технологии с отрицательным кислородным балансом, удельная поверхность данных частиц составляет $300\pm300 \text{ m}^2/\text{г}$, а размер первичных монокристаллов составляет 4-20 нм, размер агрегатов 4-600 нм [5]. Для модифицирования фторсодержащих покрытий использовали, как УДАГ - смесь продуктов взрыва из которой кислотной обработкой при повышенных температурах выделяют ультрадисперсные кластеры алмаза, так и сами наночастицы алмаза. Для достижения гомогенности распределения частиц по объему раствора фторсодержащих олигомеров использовали ультразвуковую обработку раствора фторсодержащего олигомера. Содержание нанодисперсного модификатора в растворе ФСО составляло от 0,1 масс.% до 3 масс.% по сухому остатку. Для придания нанофазным композиционным фторсодержащим покрытиям повышенных эксплуатационных характеристик проводили термообработку при T=373 K, 473 K, 523 K в течение 1 часа. Исследование морфологии тонкослойных покрытий проводили с помощью атомно-силового микроскопа NT-206 производства «Микротестмашины» г.Гомель. Физико-механические характеристики покрытий определяли с помощью микротвердометра ПМТ-3 и нагрузке 100 грамм.

2.Основное содержание и результаты работы.

В настоящее время при изучении тонкослойных фторсодержащих покрытий, получаемых из жидкой фазы, существуют следующие феноменологические модели формирования покрытий (рис.1) [4]. В структуре пленки сочетаются слои с различным упорядочением вследствие ослабления действия силового поля поверхности

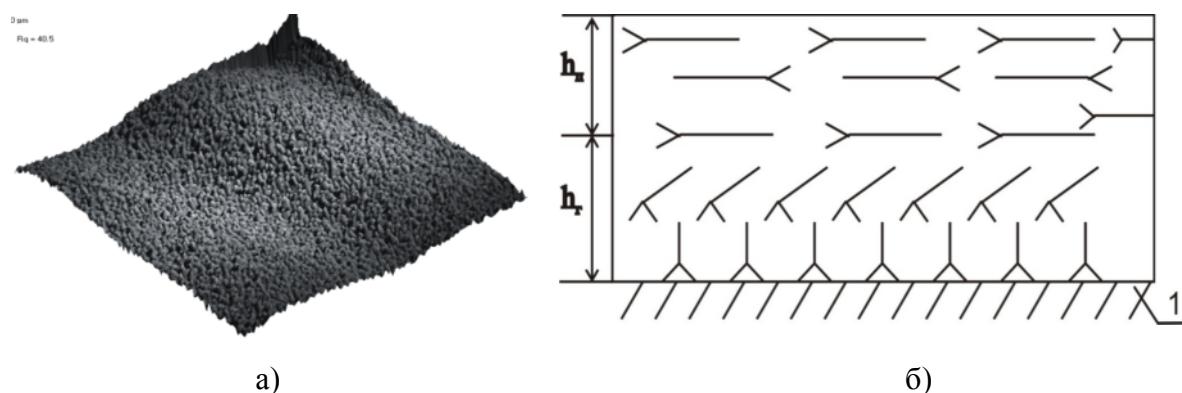


Рис. 1. Морфология (а) и схема строения (б) фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из стали 45

металлической подложки. Толщина граничного слоя h_r и соотношение толщины упорядоченного и неупорядоченного поверхностного слоя $h_r: h_p$ определяются строением макромолекулы (типом и количеством полярных функциональных групп) и активностью металлической подложки (строением и толщиной оксидного слоя, дефектностью, зарядовым состоянием, фазовой структурой и т.п.).

Особый интерес представляют покрытия, модифицированные нанодисперсными частицами (рис.2). Модификация полимерных и олигомерных материалов нанодисперсными частицами приводит к синергическому изменению физико-механических характеристик, как объемных материалов, так и покрытий, пленок [6].

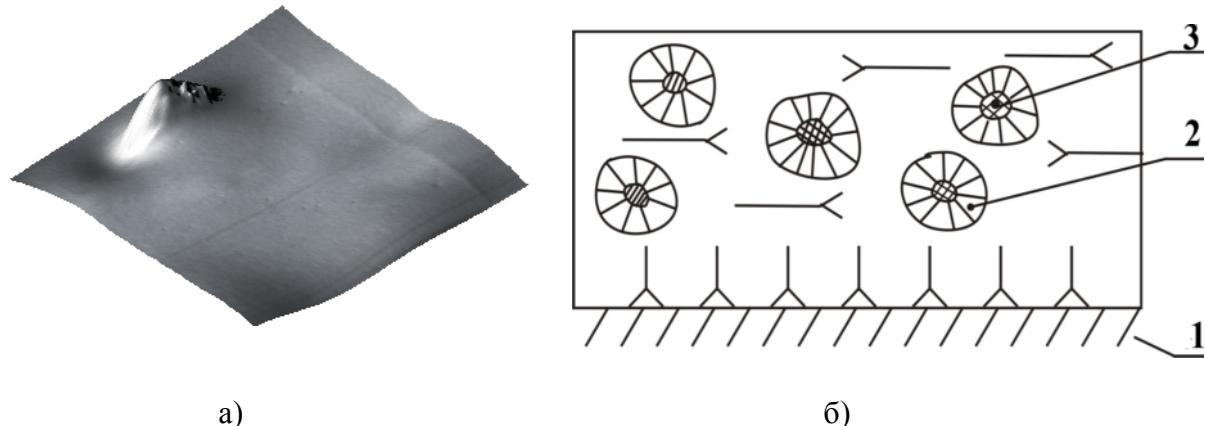


Рис. 2. Морфология (а) и схема строения (б) из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из стали 45, наполненных наночастицами [4]

Согласно результатов, представленных в работе [4] структурирование матриц может быть достигнуто и путем введения в их состав низкоразмерных частиц, обладающих нескомпенсированным зарядом, обусловленным особенностями синтеза или подготовки (например, диспергирования в дисембраторах). Энергетическое воздействие модификаторов подобного типа приводит к образованию в объеме композиционного покрытия фаз 3 с упорядоченным граничным слоем 2 вокруг каждой частицы (рис. 2).

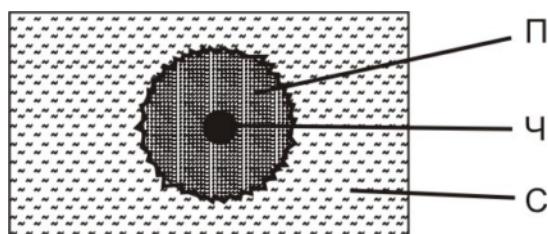


Рис. 3. Составные части композита: наночастица наполнителя (Ч), связующее (С), модифицированное под действие наночастицы наполнителя связующее (П)

В работе [7] для определения модифицирующего влияния наночастиц на близлежащие слои полимерной или олигомерной матрицы применяют следующее выражение:

$$L = r \left[1 + \frac{\rho_n}{\rho_p} \left(\frac{1}{C_n} - 1 \right) \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где r - размер частицы; ρ_n и ρ_H - плотность наполнителя и полимера; C_H - концентрация наполнителя. Параметр L - толщина полимерной матрицы, в которой частица модификатора проявляет свою активность [6]. В случае, если модифицирующее влияние наночастиц проявляется при их допинговом содержании, то $1/C_H > 1$, тогда уравнение (1) можно представить в виде (2):

$$L = r_1 \sqrt[3]{\frac{\rho_H}{\rho_n C_H}}. \quad (2)$$

В работе [6] толщина модифицированного поверхностного слоя кристалла оценивается уравнением

$$S_{nl} = 0,5L_n, \quad (3)$$

$$L_n = \frac{230}{\sqrt[3]{\Theta_D}}, \quad (4)$$

где L_n - размер частицы обладающей наносвойствами, Θ_D - температура Дебая.

При рассмотрении нанокомпозиционных материалов, как кластерных систем для случая идеального расположения наночастиц наполнителя в объеме полимерной (олигомерной) матрицы, толщина модифицированного слоя определяется уравнением:

$$h = r - \frac{1}{\sqrt[3]{2n}}, \quad (5)$$

где n - плотность частиц наполнителя.

Приведенные выше уравнения предложены для объемных объектов, поэтому представляет интерес рассмотреть возможность их применимости для тонкослойных систем, толщина которых не превышает 10 мкм.

На рис.4 представлены АСМ-изображения нанокомпозиционных тонкослойных фторсодержащих покрытий, сформированных при различных технологических режимах. Исходя из полученных данных методом атомно-силовой микроскопии видно, что на морфологию получаемых нанокластеров оказывает существенное влияние тип подложки, полярность применяемого фторсодержащего олигомера, термообработка, концентрация модификатора. В зависимости от выбранного технологического метода модификации возможно получение различных по своей морфологии нанокластеров в структуре покрытия, что в конечном результате скажется на физико-механических характеристиках нанокомпозиционных фторсодержащих покрытий. Проведенные исследования по определению микротвердости нанокомпозиционных покрытий, сформированных на металлических поверхностях показали, что введение нанодисперсных частиц в структуру фторсодержащих покрытий приводит к неоднозначным результатам по определению прочностных характеристик металлических подложек. При модификации покрытия фторсодержащего олигомера, сформированного на алюминиевой подложке, нанодисперсными частицами УДАГ значения микротвердости композиционного покрытия несколько возрастают (табл.1).

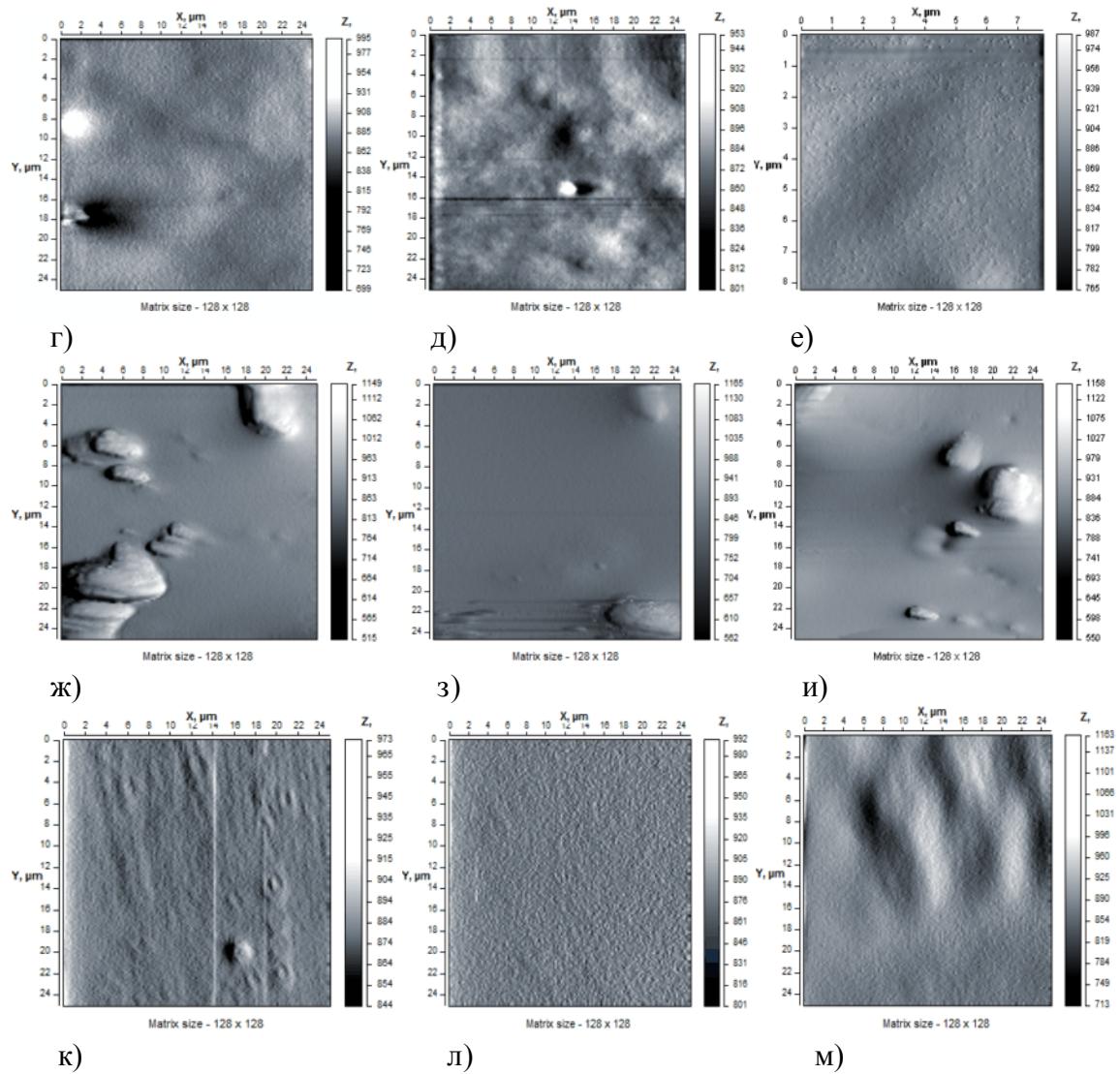


Рис. 4. Морфология нанокомпозиционных покрытий, сформированных на твердых подложках различной природы, в том числе при воздействии технологических факторов: а) медная подложка с покрытием ФСО Ф14, содержащим 0.3 масс.% УДАГ; б) медная подложка с покрытием ФСО Ф14, содержащим 0.1 масс.% УДАГ; в) медная подложка с покрытием ФСО Ф1; г) медная подложка с покрытием ФСО Ф14, содержащим 0.3 масс.% УДАГ и термообработанной при $T=373\text{K}$ в течение 60 минут; д) медная подложка с покрытием ФСО Ф1, содержащим 0.3 масс.% УДАГ и термообработанной при $T=373\text{K}$ в течение 60 минут; е) железная подложка с покрытием ФСО Ф1, содержащим 0.3 масс.% УДАГ; ж) стеклянная подложка с покрытием ФСО Ф1, содержащим 1 масс.% УДАГ; з) стеклянная подложка с покрытием ФСО Ф1, содержащим 1 масс.% УДАГ; и) медная подложка с покрытием ФСО Ф14, содержащим 1 масс.% УДАГ

Превышение содержания модификатора в покрытии выше 0.3 масс.% приводит к снижению значений микротвердости по сравнению с покрытием не содержащим модификатора. Термообработка нанокомпозиционных фторсодержащих покрытий, сформированных на алюминии приводит к дальнейшему снижению значений микротвердости. Аналогичная тенденция изменений значений микротвердости наблюдается и для нанокомпозиционных покрытий, сформированных на медной

подложке. При формировании фторсодержащих покрытий, модифицированных нанодисперсными частицами УДАГ (размер частиц 4-600нм), на стальной подложке нанокомпозиционные слои проявляют протекторные свойства, выражющиеся в увеличении значений микротвердости нанокомпозиционных покрытий, в том числе и при проведении термообработки (табл.1).

Таблица 1. Микротвердость нанокомпозиционных покрытий, сформированных на металлических подложках из фторсодержащего олигомера Ф14 и УДАГ

Темпе- ратура, К	Концентрация УДАГ в покрытии, масс. %						Тип подлож- ки
	исх. покрытие	0,1	0,3	0,5	1	3	
	Значения микротвердости, кг/мм ²						
293	44	47	46	33	33	36	Al
373	43	33	35	34	35	35	
473	42	34	36	32	34	34	
523	42	18	17	17	17	18	
293	127	84	84	95	85	84	Cu
373	115	86	92	87	97	78	
473	112	78	72	76	85	68	
523	105	41	38	53	53	54	
293	196	231	241	170	147	221	Fe
373	212	190	192	202	192	212	
473	214	210	238	226	214	228	
523	208	219	224	221	212	228	

Введение нанодисперсных модификаторов приводит к изменению морфологии и физико-механических характеристик покрытий, что связано со структурными изменениями. В работе [6] рассмотрены возможные механизмы трансформирования структуры полимерных матриц. Проведенный анализ представленных уравнений показывает, что для случая тонкослойных покрытий данные выражения дают лишь приблизительную оценку размеров нанокластеров, образованных в покрытии фторсодержащих олигомеров при модифицировании УДАГ (табл. 2).

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные размеры нанокластеров, образующихся в модифицированных наночастицами покрытиях фторсодержащих олигомеров, формируемых на металлических подложках

Размер нанокластера, рассчитанный из уравнения 1			Размер нано-кластера, рассчи-танный из ур-я 3 и 4	Размер нано-кластера, рассчи-танный из ур-я 2	Размер нанокластера, определенного методом АСМ.		
0,1 мас.% УДАГ	0,5 мас.% УДАГ	3 мас.% УДАГ			0,1 мас.% УДАГ	0,5 мас.% УДАГ	3 мас.% УДАГ
7,9мкм	4,6мкм	2,5мкм	28,65 нм	7,9 – 2,5 мкм	1x1 мкм	2x6 мкм	3x4 мкм

Возможно предположить, что кластерные структуры, образующиеся при модифицировании тонкослойных покрытий фторсодержащих олигомеров состоят из нескольких нанодисперсных частиц, вокруг которых происходит образования нанокластера или данные кластеры взаимодействуют друг с другом с образованием более крупных агломератных структур. Данное предположение подтверждается исследованиями проведенными методом атомно-силовой микроскопии по изучению морфологии данных нанокластеров.

Исходя из данных АСМ, полученных в режиме обработки «Профиль» показали, что изучаемый кластер размером $\sim 2,5$ мкм состоит из трех более мелких по размеру кластеров размерами от 0.2 до 1.5 мкм (рис.5).

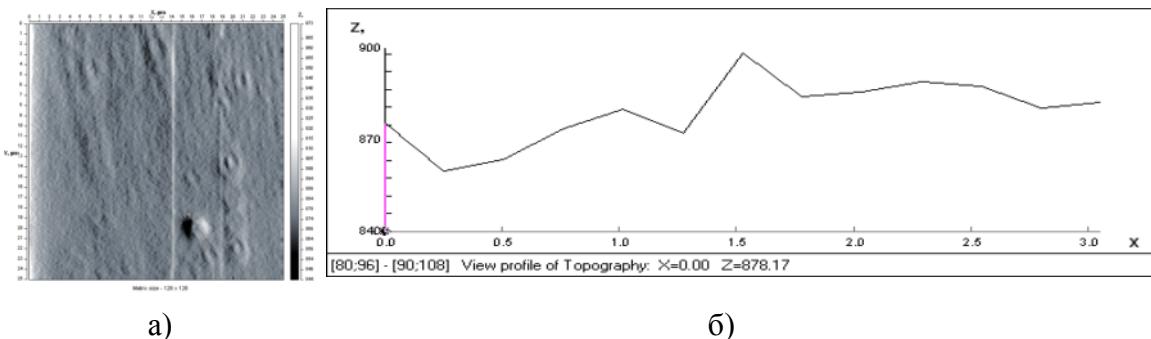


Рис. 5. Морфология нанокластера в покрытии фторсодержащего олигомера, модифицированного УДАГ и сформированного на поверхности стекла: а) морфология, б)топография

Для описания данных структур возможно предложить следующую модель формирования нанокластерных агломератов, представленную на рис.6. Более точное определение размеров нанокластерных структур, образуемых при модифицировании фторсодержащих покрытий возможно получить учитывая количество наночастиц в данном нанокластере и зарядовую активность поверхностных слоев подложек, на которых формируются нанокомпозиционные покрытия. Таким образом, формулу (1) можно представить в виде:

$$L = nr_1^3 \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_{\Pi} C_H}} + C, \quad (6)$$

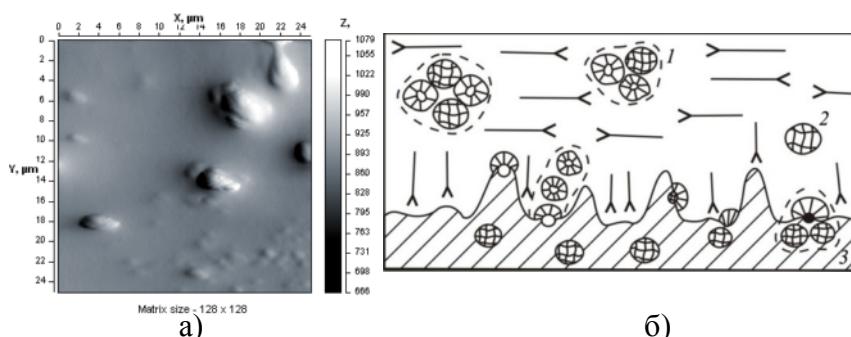


Рис. 6. Морфология (а) и схема строения (б) фторсодержащих покрытий, модифицированных наночастицами (и,к), в том числе подвергнутых энергетическому воздействию: 1-нанокластерный агломерат, 2- нанокластер, 3-подложка

где n -количество нанодисперсных частиц в кластере; C – размерный параметр, учитывающий влияние зарядовой активности поверхности подложки на размер нанокластерной структуры [8].

Заключение.

Исходя из проведенных исследований предложена модель формирования нанокомпозиционных

тонкослойных покрытий при модифицировании нанодисперсными частицами, обладающими собственным нескомпенсированным зарядом. Рассмотрена возможность использования уравнений, применяемых для определения геометрических параметров нанокластеров в объемных материалах к тонкослойным покрытиям и пленкам. Установлено, что в большинстве случаев данные выражения не коррелируют с экспериментальными данными. Предложено уравнение, позволяющее адекватно оценить геометрические параметры нанокластеров, образующихся в двумерных объектах в зависимости от заряда нанодисперсной частицы, зарядовой мозаики твердой поверхности, концентрации модификатора в покрытии. Основными параметрами, оказывающими влияние на морфологию, физико-механические характеристики нанокомпозиционных покрытий являются: тип заряда частицы наномодификатора; строение молекулы олигомера; технологические факторы, используемые при формировании покрытия (концентрация модификатора, температура).

Список литературы: 1.Овчинников, Е.В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е.В.Овчинников, В.А.Струк, В.А.Губанов.– Гродно: ГГАУ, 2007 – 326 с. 2.Авдейчик, С.В Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов. Ч.1. Модельные представления./ С.В.Авдейчик, В.И.Кравченко, Ф.Г.Ловшенко, Г.Ф.Ловшенко, Е.В.Овчинников, В.А.Струк – Гродно: ГГАУ, 2007 – 318 с. 3.Кравченко, В.И. Промышленность региона:проблемы и перспективы инновационного развития/В.И.Кравчеко, А.А.Дудук, В.А.Струк, Г.А.Костюкович, О.В.Авдейчик, А.И.Гордиенко, М.Е.Кипnis, Е.В.Овчинников – Гродно:ГГАУ, 2008 – 418с. 4. Е.В. Овчинников, А.А. Рысколов, В.В.Андрикович, В.И.Кравченко Тонкопленочные покрытия для трибосистем/ Композиционные материалы в промышленности. Трубопроводы из полимерных композиционных материалов: изготовление, проектирование, строительство, эксплуатация: Материалы Двадцать Девятой международной конференции и семинара 1–5 июня 2009 г., Ялта – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009 – с.466-472. 5. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. – С-Пб: Изд-во СПбГПУ. – 2003. – 344 с. 6. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение /С.В. Авдейчик, В.А. Лиопо, В.Я. Прушак, В.А. Струк //Под ред. В.А. Струка/ – Мин.: Технология. – 2006. - 427 с. 7. Лиопо В.А., Струк В.А., Овчинников Е.В., Михайлова Л.В. Особенности строения полимерных композитов, модифицированных углеродными добавками //Вестник ГрГУ: Серия 2. – Т. 3. – № 1. – 2000. – С. 47–53. 8. В.А. Лиопо, С.В. Авдейчик, Л.В. Михайлова, А.С. Воронцов Тонкие пленки воды: особенности структуры и диэлектрических характеристик / Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Девятой ежегодной международной конференции, 9 – 13 февраля 2009 г., п. Славское, Карпаты – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009 – с.38-42.

СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

E.B.Овчинников (УО ГрГУ им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь)

Аннотация. Проведены исследования структуры и физико-механических характеристик композиционных покрытий сформированных на базе фторорганических соединений, модифицированных ультрадисперсными частицами алмазосодержащего графита (УДАГ). Предложена модель формирования нанокомпозиционного покрытия, при введении в него нанодисперсных частиц углерода. Проведена оценка применимости уравнений используемых

для определения размеров и модифицирующего влияния наночастиц на близлежащие слои полимерной или олигомерной матрицы в трехмерных объектах, для случая, когда свойства объекта зависят от их размера в одном из направлений (толщины пленки или покрытия). Установлено синергическое влияние типа подложки, структуры фторсодержащих олигомеров и ультрадисперсных частиц алмазосодержащего графита на физико-механические характеристики формируемых покрытий.

Ключевые слова: структура, алмазоподобные покрытия, фторсодержащие пленки, твердость.

STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF NANOCOMPOSITE COATINGS.

Y.Auchynnikau (Grodno State University them. Yanka Kupala Grodno, Belarus).

Abstract. The investigation of the structure and physical-mechanical characteristics of composite coatings formed on the basis of Organofluorine compounds modified with ultrafine particles of diamond-graphite (UDAG). A model of the formation of nanocomposite coatings, the introduction into it of nanoparticles of carbon. The evaluation of the applicability of the equations used to determine the size and the modifying effects of nanoparticles on neighboring layers of polymeric or oligomeric matrix in three-dimensional objects, in the case where the object properties depend on their size in one direction (the thickness of the film or coating). Established a synergistic effect of the type of substrate, the structure of fluorinated oligomers and ultrafine particles of diamond-graphite on physical and mechanical characteristics of the formed coatings.

Keywords: structure, diamond-like compounds, fluorine-containing film microhardness.

Надійшла до редколегії 11.02.2011.

УДК 621.43.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВС

Осипов К.Н. (СевНТУ, г. Севастополь, Украина)

E-mail: assistenttmm@mail.ru

Аннотация: В статье предлагается методика проведения приемосдаточных испытаний ДВС, связанная с проведением испытаний на неустановившихся режимах для воспроизведения эксплуатационных нагрузок в ходе испытаний. Предлагается структурная схема процесса проведения приемосдаточных испытаний.

Ключевые слова: испытания, двигатель внутреннего сгорания, диагностика.

1. Введение

Постоянно растущая сложность современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) объясняет ужесточение требований к их качеству, в том числе, надежности, ресурсу, экологической безопасности и т.д. [1]. Важную роль в обеспечении этих требований играют приемосдаточные испытания как завершающий этап производства двигателей. При этом точность и достоверность результатов испытаний в виде решений о возможности будущей эксплуатации ДВС зависят от технологии испытаний, методов обработки измерительной информации, адекватности воспроизведения реальных режимов эксплуатации на стендах и т.д. Совершенствование приемосдаточных испытаний по-прежнему представляет актуальную задачу современного машиностроения, двигателестроения [3]. Её решение связано с совершенствованием существующих методик испытаний на основе математических моделей и методов обработки экспериментальной информации, взаимосвязей между параметрами испытуемых двигателей.

Многие исследователи [1,3,4] видят главное направление повышения эффективности испытаний в использовании физических методов контроля (ультразвуковых, рентгеновских и д.р.) и систем комплексной автоматизации. К сожалению, это связано с заменой существующего испытательного оборудования, что приведет к существенному увеличению себестоимости испытаний, стоимости готовой продукции и, в результате, к снижению конкурентоспособности.

В современных условиях постсоветского пространства необходимо повышение качества испытаний без существенного увеличения их стоимости [2]. Под повышением качества понимается повышение достоверности получаемых в ходе испытаний результатов. Компромисс между повышением качества приемосдаточных испытаний и минимизацией капитальных вложений может быть достигнут совершенствованием применяемых в производстве методик испытаний и модификацией действующего испытательного оборудования без вывода его из эксплуатации.

Целью данной работы является повышение достоверности результатов приемосдаточных испытаний ДВС путем совершенствования методики их проведения на основе определения эффективных режимов нагружения.

2. Основное содержание и результаты работы

На отечественных предприятиях приемосдаточным испытаниям подвергается каждый собранный двигатель. Техническое состояние двигателей характеризуется величиной структурных параметров (шероховатостью, биением, отклонением формы и т.д.), однако в ходе испытаний его оценивают по величине диагностических параметров, которые функционально зависят от структурных параметров [4,5].

Для бензиновых четырехтактных двигателей внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием основными диагностическими параметрами являются: крутящий момент, средняя эффективная мощность, расход топлива, давление масла, содержание токсических компонентов в отработавших газах. Определение численных значений диагностических параметров осуществляется на специализированных тормозных стендах, обеспечивающих испытуемый двигатель маслом, топливом, охлаждающей жидкостью и другими необходимыми горюче-смазочными материалами. Непосредственное измерение численных значений диагностических параметров осуществляется на различных (как правило, трех или четырех) установившихся режимах работы двигателя:

$$M_C = M_k = \text{const} \pm 2\%, \omega = \text{const} \pm 2\%, \quad (1)$$

где M_C – тормозной момент, создаваемый нагружающим устройством стенда, M_k – крутящий момент, развивающийся ДВС, ω – угловая скорость коленчатого вала двигателя [ГОСТ 14845-88].

Рассмотрим особенности и недостатки применяемой на отечественных предприятиях методики приемосдаточных испытаний ДВС.

Обычно в ходе приемосдаточных испытаний работоспособность двигателей оценивают, используя статические характеристики (например, скоростные), путем сравнения значений диагностических параметров, измеренных в характерных точках, с верхней и нижней границами области работоспособности ДВС в установившемся режиме [ГОСТ 14845 - 88].

Однако установившийся режим работы ДВС является частным случаем эксплуатации и по времени не превышает 10 % от ее общей продолжительности. В результате испытания на установившихся режимах работы не позволяют полностью оценить способность двигателя выполнять основные функции: поддерживать заданный

скоростной режим транспортного средства в любых дорожных условиях, при необходимости быстро переходить с режима минимальной нагрузки на режим максимальной нагрузки и т.д. [6]. Поэтому проведение испытаний ДВС на установившихся режимах работы представляется нецелесообразным.

Проведение испытаний на установившихся режимах ведет к сложности в определении скрытых или медленно развивающихся дефектов. Например, наиболее опасным дефектом новых двигателей является перекос поверхностей в сопряжениях подвижных деталей (коленчатый вал – маховик, распределительный вал – корпус, шатун – крышка шатуна и т.д.), вызванный погрешностями сборки [7].

В условиях работы двигателей на установившихся режимах проявление данных дефектов возможно только в условиях критического ослабления резьбовых соединений. Это объясняется, например, для сопряжения коленчатый вал – маховик (рис.1), тем, что на установившемся режиме угловая скорость всех точек маховика и коленчатого вала одинакова, а момент сопротивления, направленный в сторону, обратную вращению, полностью компенсируется крутящим моментом, развивающимся ДВС по условию (1). Следовательно, перемещения деталей резьбовых соединений, жестко связанных с маховиком и коленчатым валом, относительно собственной оси вращения, которые

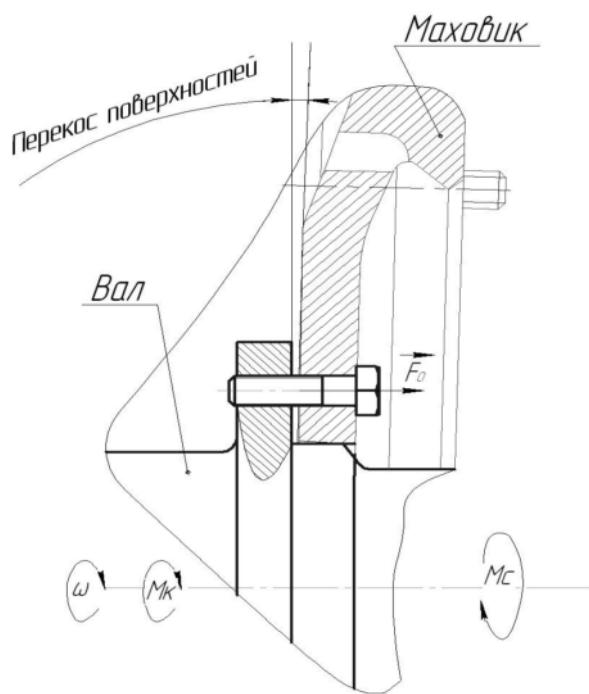


Рис. 1. Схема сопряжения вал-маховик

поверхностей в условиях неустановившегося движения наступают моменты, когда гайка (болт, винт и т.д.) практически освобождается от действия осевых сил F_o . В результате этого даже незначительные внешние усилия вызывают ее поворот и, как следствие, самопроизвольное отвинчивание. В отсутствие дефекта сдвиг не возникает, так как перемещению одной поверхности по отношению к другой, а также возникновению отвинчивающего момента M_{otb} препятствуют момент силы трения M_F , возникающий в результате плотного сопряжения поверхностей, момент силы трения в резьбе M_p и момент силы трения на торце гайки (болта и т.д.):

$$M_{otb} \ll [M_F + M_T + M_P]. \quad (2)$$

Известно, что неустановившийся режим работы в 5 – 10 раз увеличивает скорость развития микро- и макротрещин в деталях, появление которых вызвано нарушением технологии их производства [8]. В настоящее время из-за несовершенства технологии испытаний данные дефекты проявляются, как правило, только в ходе эксплуатации. На рисунке 2 приведен пример разрушения шатуна из-за наличия производственного дефекта; пробег автомобиля на момент проявления дефекта не превышал 5 % от заявленного производителем срока службы.

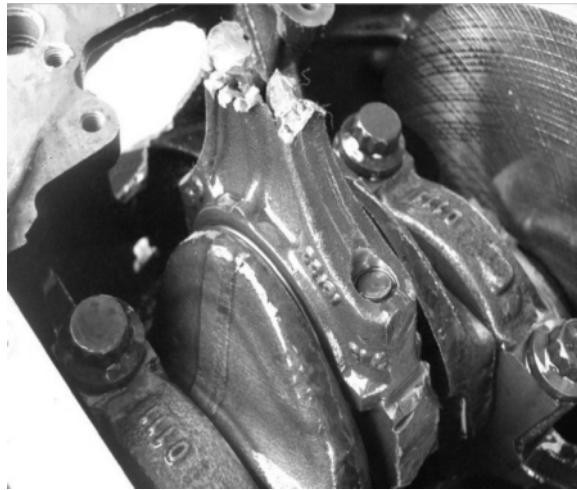


Рис. 2. Разрушение шатуна вследствие наличия производственного дефекта

сопротивления на валу нагружающего устройства по некоторому закону. Закон изменения момента сопротивления может быть найден двумя способами. Первый способ заключается в измерении момента сопротивления движению в ходе натурных исследований (например, на полигоне). Второй способ – теоретический. Он связан с решением системы двух уравнений [9]. Первое уравнение описывает движение автомобиля:

$$Mk - M_{\Sigma} = (J_A + J_M) \cdot \varepsilon_{\delta}, \quad (3)$$

где M_k – крутящий момент на валу ДВС, $M_{\Sigma} = \frac{r_k}{i_{k,n} \cdot i_0 \cdot \eta} \cdot \left(G_a \cdot \psi + \frac{W \cdot v_a^2}{13} \right)$ –

суммарный момент сопротивления, имитирующий сопротивление дороги и воздуха, r_k – радиус колес автомобиля, $i_{k,n}$ – передаточное число коробки передач, i_0 – передаточное число главной передачи, ψ , G_a – суммарный коэффициент сопротивления качению автомобиля и вес автомобиля соответственно, v_a – скорость автомобиля, η – к.п.д. трансмиссии, W – фактор обтекаемости автомобиля, J_A – момент инерции, имитирующий момент инерции автомобиля, J_M – момент инерции движущихся деталей двигателя, ε_{δ} – угловое ускорение коленчатого вала двигателя.

Второе уравнение описывает движение коленчатого вала двигателя, жестко связанного с нагружающим устройством стенда:

$$Mk - M_C = (J_T + J_M) \cdot \varepsilon_{\delta} \quad (4)$$

где M_C – момент сопротивления, развиваемый нагружающим устройством, J_T – момент инерции вращающихся масс нагружающего устройства.

Уравнение для описания закона изменения момента сопротивления получается путем исключения параметра ε_{δ} из уравнений (3) и (4):

$$M_C = \left(\frac{J_A - J_T}{J_M + J_A} \right) M_K + \left(\frac{J_A - J_T}{J_M + J_A} \right) M_{\Sigma}. \quad (5)$$

В ходе испытаний действительный тормозной момент должен регулироваться так, что бы он был равен расчетному значению тормозного момента, которое определяется в каждый момент времени по формуле (5). Однако действительный тормозной момент, развиваемый тормозом, может отличаться от требуемого значения из-за наличия ограничений, которые обусловлены внешними характеристиками тормоза. Одним из путей решения данной проблемы является использование, в качестве устройства согласования ДВС с тормозом, гидротрансформатора (автоматической коробки передач). Структурная схема предлагаемого процесса испытаний представлена на рисунке 3.

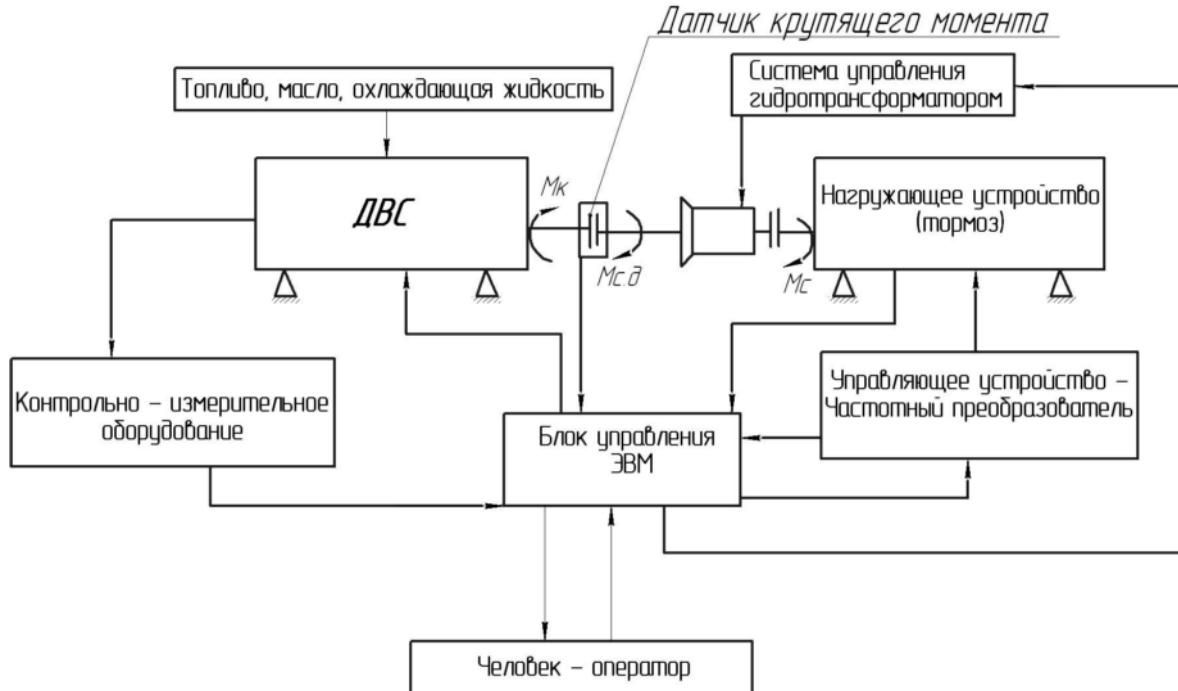


Рис. 3. Структурная схема усовершенствованного процесса испытаний

Главными отличиями предлагаемой схемы процесса приемо-сдаточных испытаний от существующей являются: 1) использование в качестве элемента управления тормозом (асинхронным электродвигателем) преобразователя частоты, который позволяет осуществлять бесступенчатое изменение нагрузки по любому заданному закону нагружения; 2) использование для согласования ДВС с тормозом гидравлического трансформатора для расширения возможностей регулирования момента сопротивления.

В качестве критерия работоспособности двигателя по динамическим характеристикам, получаемым в результате испытаний ДВС на неустановившихся режимах работы, примем не превышение в каждый момент времени предельно допустимого значения расстояния между оценочным значением диагностических параметров и эталонным значением:

$$\Delta(t) \leq [\Delta], \quad (6)$$

где $\Delta(t) = \varrho(t) - y_{\mathcal{E}}(t)$, $\varrho(t)$ – оценка диагностических параметров ДВС, $y(t)_{\mathcal{E}}$ – эталонное значение диагностических параметров ДВС, $[\Delta]$ – требуемое значение.

3. Заключение

Показано, что существующие (регламентируемые стандартами) методы проведения приемосдаточных испытаний ДВС на установившихся режимах работы не позволяют полностью и достоверно оценить техническое состояние испытуемых двигателей. Для повышения достоверности приемосдаточных испытаний ДВС предлагается методика их проведения на неустановившихся режимах нагрузления, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Основным преимуществом предложенной методики является возможность уже на стадии приемосдаточных испытаний оценить работоспособность новых двигателей в условиях будущей эксплуатации и выявить их скрытые дефекты. Дальнейшие направления исследования могут быть связаны с разработкой программного обеспечения системы автоматизированных приемосдаточных испытаний на основе современных подходов к математическому моделированию ДВС.

Список литературы: 1. Богуслаев А.В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: монография / А.В. Богуслаев, [и др.] – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2009 г. – 468 с. 2. Первухина Е.Л. Оценка состояния машиностроительных изделий в ходе производственных испытаний после сборки. / Е.Л. Первухина, П.К. Сопин, В.В. Голикова // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009, №10. 3. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов / В.И. Пронякин // Измерительная техника. – 2008. – №10. – С 9-13. 4. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Коваев: – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с. 5. Atkins R. An introduction to engine testing and development / R. Atkins: – USA: SAE International, 2009. – 307 р. 6. Mollenhauer Klaus. Handbook of diesel engine. / Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 р. 7. Маренков Н. А. Обнаружение дефектов судовых дизелей / Н. А. Маренков: –М.: «Транспорт», 1975. – 224 с. 8. Канацук В. Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы / В. Е. Канацук: – Киев,: «Наук. думка», 1978. – 256 с. 9. Стефановский Б.С. Испытания двигателей внутреннего сгорания. / Б. С. Стефановский [и д.р.]: – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ПРИЙОМОЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДВЗ

Osipov K.M. (СевНТУ, г. Севастополь, Україна)

Анотація: У статті пропонується методика проведення прийомоздавальних випробувань ДВЗ, яка полягає в імітації експлуатаційних навантажень у ході випробувань. Пропонується структурна схема процесу проведення прийомоздавальних випробувань.

Ключові слова: випробування, ДВЗ, діагностика.

CHOICE OF REGIME FOR ICE TESTING

Osipov C.N. (SNTU, c. Sevastopol, Ukraine)

Abstract: The methods to test internal combustion engines just after assemblage are proposed. They are based on unsteady functioning regimes to simulate working loads during testing. The structure scheme of the testing process is built.

Key words: internal combustion engines, industrial testing, testing regime.

Надійшла до редколегії 28.01.2011.