

УДК 621.43

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОСОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Д.А. Гительман, соискатель, А.В. Дунаев, канд.техн.наук, В.Н. Колокольников, инженер, К.С. Поджарая, аспирант, Р.Ю. Соловьев, канд.техн.наук

ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, тел. 8-499-174-81-71,
e-mail: dunaev135@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования триботехнических свойств гексагонального нитрида бора в трибосоставе Micro-Ceramic Universal-Oil фирмы Wagner в сравнении с моторным маслом M-10Г_{2К} и трибосоставами КАРАТ на трибометре TRB-S-DE Швейцарской фирмы CSM-Instruments.

Ключевые слова: нитрид бора гексагональный, масло M-10Г_{2К}, трибосоставы КАРАТ-М, КАРАТ-5, Micro-Ceramic Universal-Oil и Eco-Universal Oil-Package, коэффициент трения, износ.

Нитрид бора BN - бинарное соединение бора и азота известен уже свыше 100 лет и материалы на его основе являются основой многих современных технологий. А нитрид бора гексагональный, как электронный аналог графита имеет очень большое сходство со его структурой. Молярная масса первого - 24.818 г/моль, насыпная плотность 2.18 - 2,29 г/см³.

Кристаллический нитрид бора изоэлектронен углероду и подобно ему существует в нескольких аллотропных модификациях: гексагональный α -BN, кубический b-BN (боразон) и ромбоэдрический g-BN.

Кристаллическая структура α -BN состоит из графитоподобных сеток, расположенных, в отличие от структуры графита, точно одна под другой с чередованием атомов бора и азота по оси Z. Расстояние между сетками в решетке кристаллов нитрида бора 3,34Å и меньше, чем у графита (3,40 Å), что свидетельствует о более прочной связи между сетками в структуре нитрида бора в сравнении с графитом. Из-за близости структуры и некоторых физических свойств графита и нитрида бора α -BN называют «белым графитом». В отличие от графита отдельные кристаллы α -BN прозрачны. α -BN давно применяется в качестве твёрдой высокотемпературной смазки и в этом превосходит графит.

Гексагональный нитрид бора выпускают предприятия в России и за рубежом по нескольким ТУ: ТУ 2-036-707-77 или ТУ 2-036-238-74; ТУ У 26.8-00222226-007-2003; ТУ 2155-313-05808008-00; ТУ 6-00-05808008-285-93; ТУ 2112-003-49534204-2002 (таблицы 1, 2).

Таблица 1- Характеристики промышленного гексагонального нитрида бора

Показатели содержания	Нормы по ТУ, марок:		
	Гексагона- льный	ГМ	ГК
Нитрид бора (α -BN), %, не менее	97,4	97,8	98,0
Оксид бора (B_2O_3), %, не более	0,2	0,3	0,2

Карбид бора (B ₄ C), %, не более	1,5	-	0,3
Насыпная плотность, г/см ³	не менее 0,33	0,27 – 0,37	не менее 0,33
Индекс графитации, ед.	-	1,8 – 2,5	не более 1,5
Содержание фракции минус 100 мкм, %, не менее	95	95	95
То же, менее 20 мкм, %, не менее	90	-	-

Таблица 2 - Некоторые физические свойства модификаций нитрида бора

Показатели по кристаллическим модификациям	α	β	γ
Структура и цвет	Гексагональный, белый	Кубический, типа сфалерита, черный	Гексагональный, типа вюрцита, серый
Плотность, г/см ³	2,29	3,45	3,40
Микротвердость, ГПа	0,1-0,7	60-98	49-57
Модуль Юнга, ГПа	34-87	840	790

Нитрид бора гексагональный, например по ТУ 2112-003-49534204-2002, обладает тугоплавкостью ($T_{\text{дис}} = 3000 \text{ }^{\circ}\text{C}$), легкостью скольжения, **малой твердостью**, высокой среди диэлектриков теплопроводностью, интенсивнее графита отводит тепло и инертен к расплавам многих веществ. Нитрид бора по ТУ 26.8-00222226-007-2003 имел цену 2650 руб/кг (или 662,5 руб. на 5 л масла, а КАРАТ-5 700 руб.), а нитрид бора по ТУ 2-036-707-77 - 1200 руб/кг. Однако отпускная цена трибопрепаратов фирмы Wagner (200 г трибосостава на 4 л масла) - примерно 1700 руб., т.е. в 2,4 раза дороже промышленного порошка.

Считается, что α -BN как кристаллическая пластинчатая пористая слоистая структура обладает высокой термостабильностью и смазывающей способностью. А размельчённый до частиц 0,25 мкм беспрепятственно проникает через масляные фильтры. По рекламным данным, как химически инертное вещество, он обладает мощными дисперсионными свойствами, не позволяет формироваться отложениям из моторного масла, поддерживает непревзойдённую чистоту двигателя, существенно повышает смазывающую способность и теплоотвод, необходимый для высокофорсированных ДВС. Заявляется, что нитрид бора и карбон-графит позволяют моторному маслу работать дольше и в более щадящих условиях.

Таким образом, заявлено, что с появлением нитрида бора трибология значительно продвинулась. Полагают, что, классифицируясь «твердой смазкой» с низкой твердостью частиц кристаллов, нитрид бора, как будто, «сглаживает» рабочие поверхности, существенно снижает коэффициент трения и износы деталей.

Акцентируется то, что моторное масло с нитридом бора обеспечивает до 3-х раз меньший коэффициент трения именно при высоких температурах, т.е. основным преимуществом α -BN в сравнении с графитом и дисульфидом молибдена является термостойкость, т.к. α -BN сохраняет свойства смазки до 2760 $^{\circ}\text{C}$ в инертной среде и до 1600 $^{\circ}\text{C}$ в окислительной атмосфере. Поэтому полагают, что при высокой тепло-

проводности и термостойкости порошка α -BN снижаются локальные нагревы масла, резко возрастает надежность масляного клина и исключаются задиры сопряжений при высоких температурах.

Однако для обычных ДВС, используемых в нормальных условиях, свойства высокотехнологичных моторных масел избыточны, а из-за их высокой стоимости (до 1300 руб./литр) рядовому потребителю не доступны. Поэтому масла с нитридом бора еще с 90-х гг. широкого распространения так и не получили.

Для проверки рекламных данных о триботехническом нитриде бора нами проведены некоторые исследования продукции фирмы WAGNER. Так, на дифрактометре XRD-6000 в ЦКП Наноцентр ГНУ ГОСНИТИ определен фазовый состав порошка керамики фирмы WAGNER (рис. 1), а содержание примесей по рентгенофлуоресцентной спектроскопии - на приборе NITON (таблица 1).

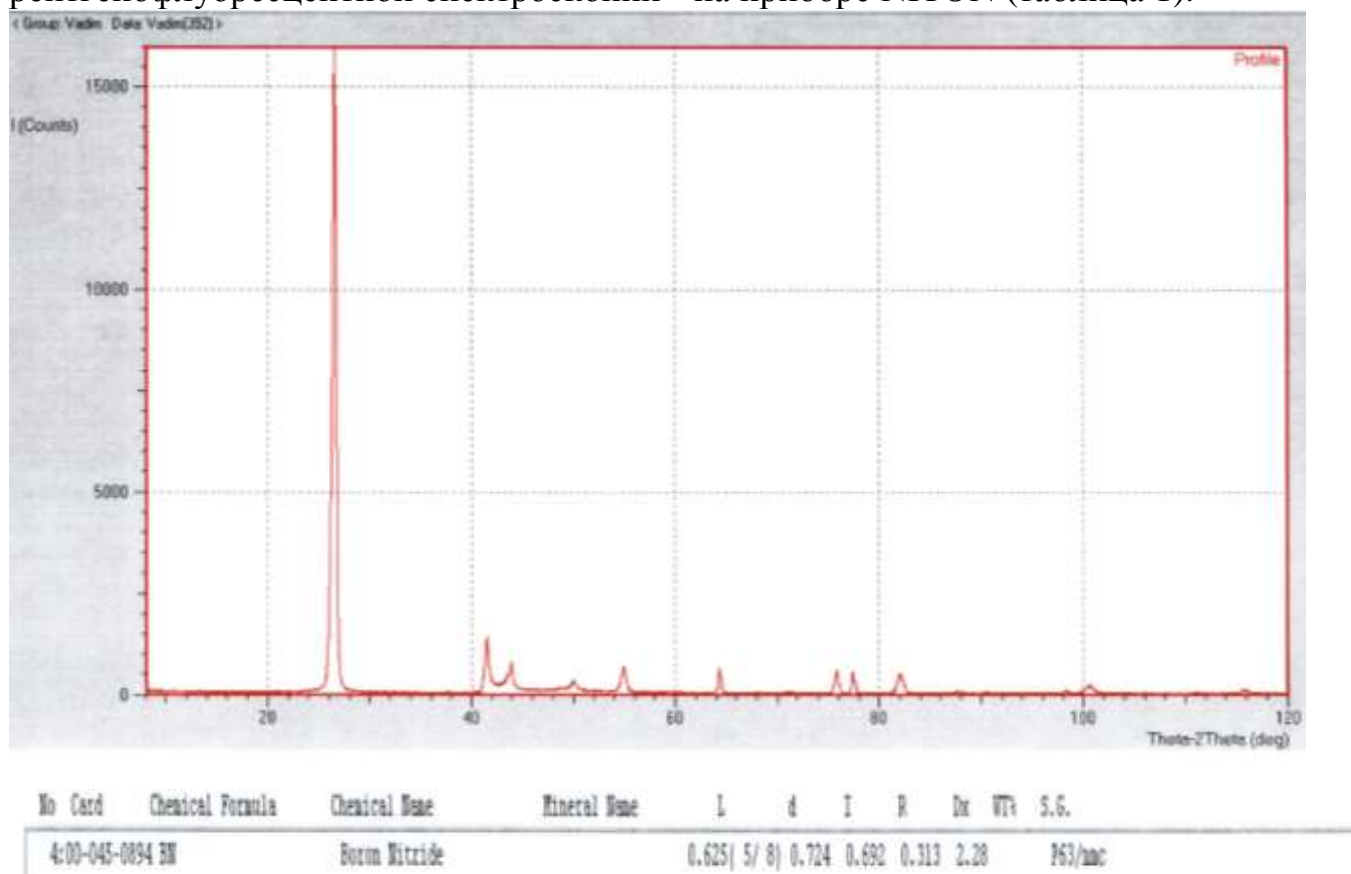


Рис. 1. Дифрактограмма порошка фирмы WAGNER: основной состав (в пяти из восьми компонентов спектров) по библиотеке ICDD - нитрид бора

Таблица 1 – Примеси в порошке нитрида бора фирмы Wagner по экспресс-режиму рентгено-флуоресцентного спектрометра Niton XL3t 900

Вещества	Содержание, ppm, по пробам		
	1	2	3
Fe ₂ O ₃	574	2700	340
S	839	845	17200
K	2600	11700	7300
Sc	13,09	14	59,39
Ti	30,8	383	552,5
V	25,74	23	86,07
Cr	151,33	158	496,76
Fe	401,07	1900	237,85

Cu	18,9	446	38,56
Mo	13,23	13	17,18
W	202,2	1800	98,32
Всего примесей	4903,72	20125,79	26472,73

Примечание: Содержание примесей соответствует данным таблицы 1.

Фракционный состав порошка определяли в Наноцентре ГОСНИТИ на инвертированном металлографическом микроскопе OLYM-PUS GX51 с программой Stream Basic на двух снимках по 60 измерениям в каждом (рис. 2).

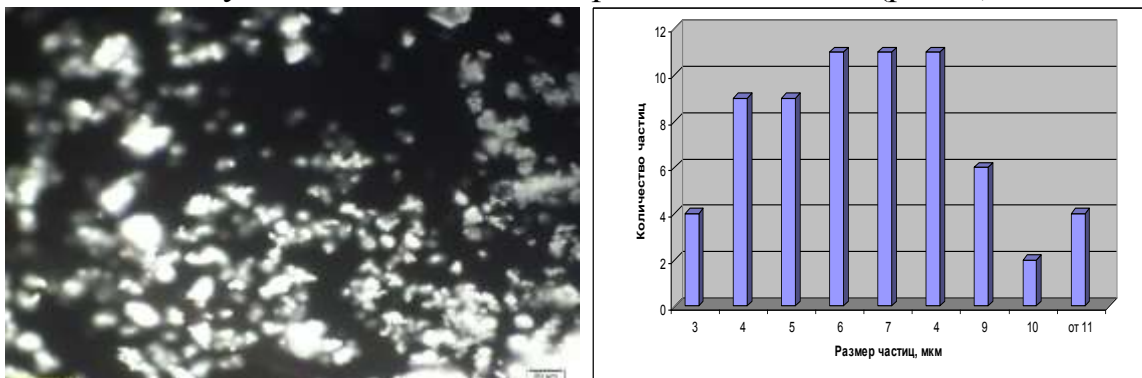


Рис. 2. Гранулометрия порошка нитрида бора фирмы Wagner: а) – микроскопия в темном поле, 500х; б) распределение частиц по размерам

По фотографиям (рис. 2) можно считать, что большая часть частиц порошка агломерирована. Размеры частиц приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Граничные значения размеров частиц, мкм

Измерение № 1			Измерение № 2		
min	max	mean	min	max	mean
1,75	21,14	7,31	3,37	13,43	7,01

Далее в Наноцентре ГОСНИТИ на трибометре TRB-S-DE швейцарской фирмы CSM-Instruments в режиме ступенчатого нагружения проведены сравнительные испытания стальной (сталь ст. 30) трибопары палец-диск в чистом моторном масле М-10Г_{2К} и с четырьмя в нем трибосоставами: наноалмазными КАРАТ-5, и КАРАТ-М по 5% от объема масла, аналогично трибосоставов Micro-Ceramic Universal-Oil и Eco-Universal Oil-Package фирмы Wagner. Нагрузки от 5 до 60 N, путь трения при нагрузке 5 N – 100 м, при других – 500 м (рис. 3).

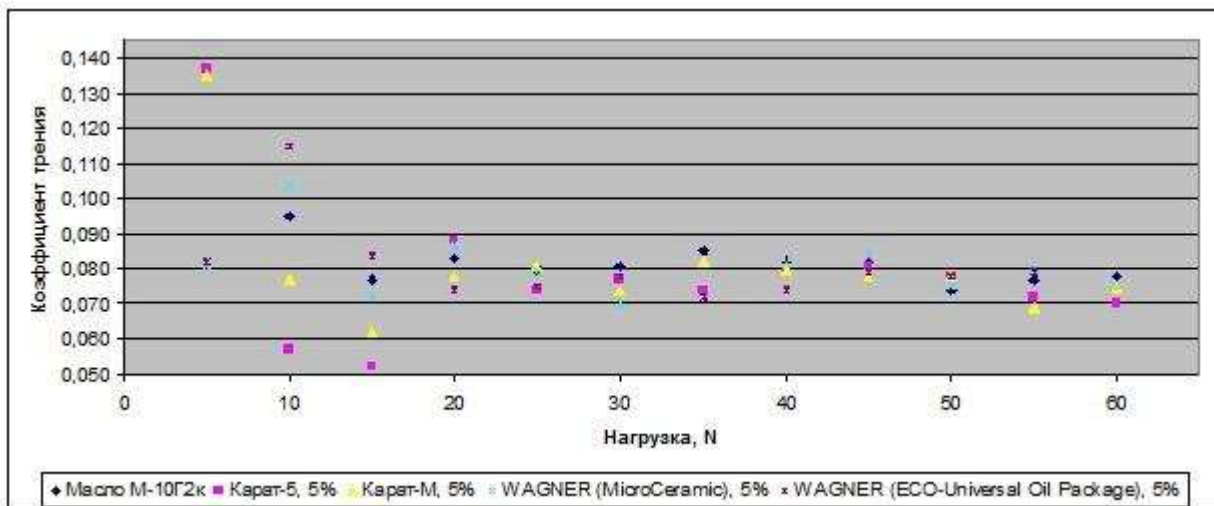


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения пары палец-диск от нагрузки в чистом моторном масле М-10Г_{2К} и с трибосоставами

Как видно из рис. 3, все трибосоставы примерно равнозначны.

Для сравнения с данными рис. 3 на рис. 4 приведены результаты исследований 2012 г. в Наноцентре ГОСНИТИ масел фирмы Мобил, М-10Г_{2К}, трибосоставов КАРАТ и разработанного в ГОСНИТИ состава «Сарановский», как одного из лучших серпентиновых трибосоставов.

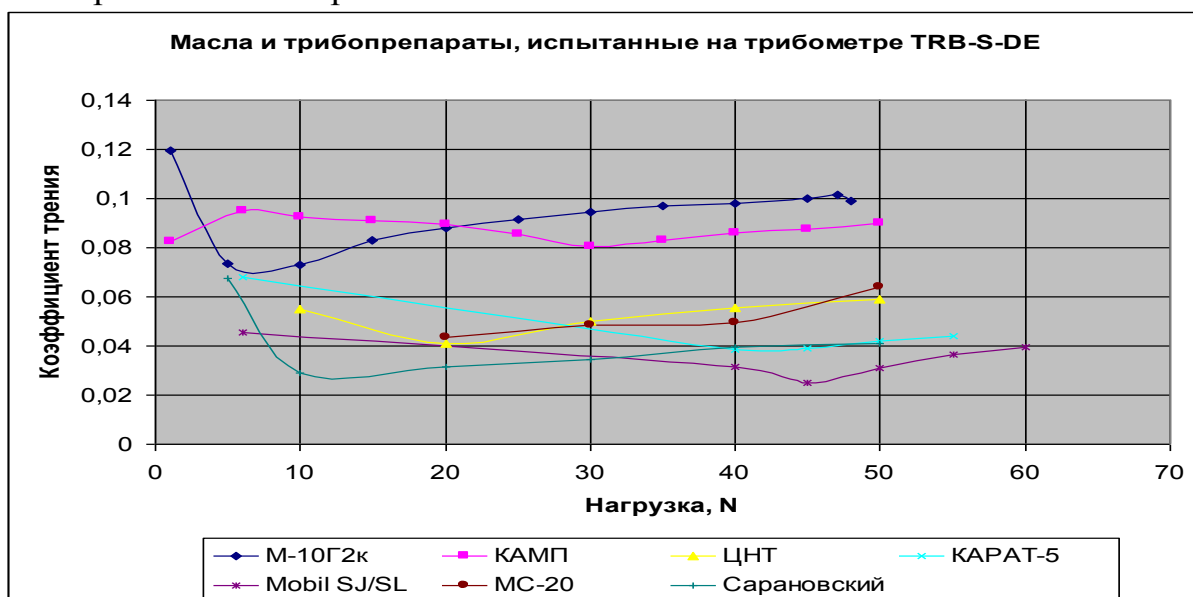


Рис. 4. Коэффициенты трения масла Мобил API SJ/SL SAE 05W-30, масла М-10Г_{2К} (ЗАО Роснефть) и введенных в последнее трибопрепаратов: профилактического КАМП (ООО «Автостанкопром»), ремонтно-восстановительных серпентиновых ЦНТ (ООО «ЦНТ»), МС-20 (ГОСНИТИ и ООО «РИП»), «Сарановский» (ГНУ ГОСНИТИ и ГНУ ВИЭСХ), наноалмазного КАРАТ-5 (ООО «Реал-Дзержинск» и Красноярский НИИ химии и химической технологии)

Материалы рис. 4 показывают хорошие триботехнические свойства моторного масла фирмы Мобил и трибосостава «Сарановский».

Проведен также анализ скорости изнашивания острия индентора пары «палец-диск» по увеличению диаметра его пятна от 498 до 590 мкм на пути трения, последовательно, вначале на чистом масле М-10Г_{2К} (до 5700 м), далее на том же

масле, но с трибосоставом КАРАТ-5 (до 11200 м), аналогично с трибосоставом КАРАТ-М (до 17300 м), а также с трибосоставами Micro-Ceramic Universal-Oil (до 17300 м) и Eco-Universal Oil-Package (до 31000 м). Аппроксимация экспериментальных данных двумя теоретическими кривыми приведена на рис. 5.

Анализ кривой износа по параболе 3-й степени с большим коэффициентом корреляции (0,9459), чем у параболы 2-й степени (0,8586) (рис. 5), может свидетельствовать о том, что все трибосоставы обеспечивали примерно равный темп изнашивания.

Износ индентора (увеличение диаметра пятна) по пути трения пары "палец - диск"

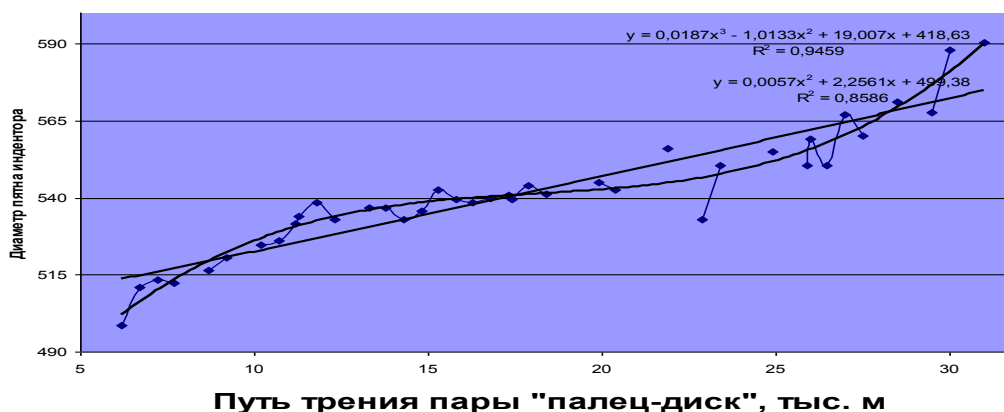


Рис. 5. Диаметры пятна износа индентора пары «палец-диск» в моторном масле М-10Г_{2К} с трибосоставами Карат-5, Карат-М и составами фирмы Wagner:

Выводы. Проведенные испытания трибопрепаратов фирмы Wagner, в т.ч. на основе нитрида бора, в сравнении с чистым маслом и наноалмазными составами КАРАТ, не противоречат ранее известным данным о том, что как третье тело высокодисперсные порошки слоистого нитрида бора (α -BN), как и высокодисперсного графита, фторированного графита и дисульфида молибдена, могут предотвращать задиры сопряжений, особенно при повышенных нагрузочно-скоростных режимах.

RESEARCH TRIBALISTAS ON THE BASIS OF HEXAGONAL BORON NITRIDE

D.A. Gitelman, seeker, A. Dunaev, Ph.D., V.N. Kolokolnikov, ing., K.S. Podgaraya, graduate, R.U. Soloviev, Ph.D.
(GNU GOSNITI agricultural, phone 8-499-174-81-71)
e-mail: dunaev135@mail.ru

Annotation: the analysis of the tribological properties of hexagonal boron nitride in triboadditives Micro-Ceramic Universal Oil by Wagner in comparison with clean engine oil М-10Г_{2К} and nanodiamond triboadditives CARAT on tribometer TRB-S-DE Swiss firm CSM Instruments.

Keywords: hexagonal boron Nitride, oil М-10Г_{2К}, nanodiamond triboadditives KARAT-M, KARAT-5, Micro-Ceramic Universal-Oil and Eco-Universal Oil-Package, coefficient of friction, wear.

