

## КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИДИЭТИЛСИЛОКСАНА И МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРЕМНЕЗЕМОВ: УЛУЧШЕНИЕ СМАЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Л.И. Борисенко<sup>1</sup>, С.А. Радзиевская<sup>2</sup>, Д.А. Щербаков<sup>2</sup>, Н.В. Борисенко<sup>1</sup>,  
В.М. Богатырев<sup>1</sup>, И.И. Войтко<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины  
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, e-mail: borysenko@naverex.kiev.ua

<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, просп. Комарова, 1, Киев, 03058, Украина

*Нанокмозиты  $TiO_2/SiO_2$  и  $ZrO_2/SiO_2$  получены методом химического модифицирования и исследованы методами рентгенофазового анализа, термогравиметрии и низкотемпературной десорбции аргона.  $TiO_2/SiO_2$  и  $ZrO_2/SiO_2$ , содержащие 2 и 5 % масс. диоксида металла, были использованы в качестве загустителей пластичных смазок на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5. Показано, что добавки нанотрубок, дисульфида молибдена, терморасширенного графита улучшают смазочные свойства таких композиций.*

### Введение

Для обеспечения работы современной техники необходимо создание новых экологически безопасных смазочных композиций, обеспечивающих эффективную работу узлов трения.

В мире производится большое количество разнообразных смазок, которые отличаются по составу, консистенции, свойствам, а, следовательно, и функциональному назначению [1–5]. Наряду с традиционными и наиболее применяемыми мыльными смазками в настоящее время все шире применяются смазки на основе соединений кремния. В качестве загустителей используют модифицированные (в том числе и оксидами различных металлов) аэросилы, а дисперсионной средой служат кремнийорганические полимеры. Такие смазки имеют широкий температурный диапазон эксплуатации, высокую химическую и радиационную устойчивость, механическую стабильность [6–8].

**Выбор дисперсионной среды.** Полисилоксановые жидкости имеют сравнительно высокие температуры кипения и, соответственно, низкую испаряемость и высокие температуры вспышки, очень низкие температуры застывания. При этом значения плотности и вязкости у них на уровне нефтяных масел. Их вязкостно-температурные характеристики намного лучше, чем у большинства минеральных масел. Значение поверхностного натяжения находится в пределах 16–30 мНм при 20 °С, что ниже, чем у нефтяных масел. Склонность к вспениванию ниже, а тепловое расширение такого же порядка, как и у минеральных масел. Обладают хорошей устойчивостью к напряжениям сдвига. Полисилоксановые жидкости не смешиваются с углеводородными маслами, плохо растворяются в гидрофильных растворителях (спиртах, кетонах, гликолях). Физиологически инертны, нетоксичны. Термическое разложение полисилоксановых жидкостей начинается приблизительно при 315 °С. Продукты их термического разложения не являются коррозионно агрессивными. Несмотря на то, что полисилоксаны являются хорошими растворителями для газов, например кислорода, азота, диоксида углерода и т.д., стойкость их к окислению выше, чем у чистых углеводородов, сложных эфиров или полиалкиленоксидов. Радиационно стойкие. Сохраняют текучесть до –40 °С [9]. Поэтому в настоящей работе выбор

силоксанового масла ПЭС-5 в качестве дисперсионной среды для создания смазочных композиций был целесообразным.

**Наполнители.** Для улучшения смазочных свойств наиболее широко применяют графит, дисульфид молибдена и другие наполнители [1–5]. Добавление этих материалов в пластичные смазки необходимо для повышения противозадирных и противоизносных свойств смазки. Влияние наполнителей на структуру и свойства смазок определяется их взаимодействием с загустителем и дисперсионной средой. При этом большую роль играют концентрация и дисперсность наполнителей, их предварительное модифицирование. Поверхностные явления, возникающие на границе раздела фаз, определяют эффективность наполнителей. С уменьшением размера частиц наполнителя увеличивается удельная поверхность и возрастает роль поверхностных явлений и, соответственно, активность данного наполнителя. Величина коэффициента трения при этом уменьшается.

**Графит.** В качестве смазочного материала графит применяется уже более 150 лет. Гексагональная решетчатая структура, высокая химическая стабильность и инертность к радиоактивному излучению обеспечивают целесообразность его использования. Нагрев на воздухе до температуры выше 450°C приводит к образованию углекислого газа. Высокие смазывающие свойства графиту обеспечивает его слоистая решетчатая структура: энергия разрыва связи между атомами углерода графита в слое составляет 715 кДж/моль, а между слоями – 17 кДж/моль [10]. Невысокий коэффициент трения графита определяется не только кристаллической структурой, а связан и с адсорбированными пленками (особенно водяных паров). В вакууме графит теряет свои антифрикционные свойства [1].

**Терморасширенный графит (ТГ).** Получают окислением и термообработкой исходного кристаллического графита. Окисление сводится к внедрению молекул и ионов серной или азотной кислоты в присутствии окислителя (пероксид водорода, перманганат калия и др.) между слоями кристаллического графита. Затем окисленный графит подвергают термообработке до  $T=1000$  °С со скоростью 400–600 °С/с. Выделяющиеся газообразные продукты создают большое (до 300–400 атм) расклинивающее давление в межкристаллитном пространстве, при этом образуется терморасширенный графит, отличающийся высокой удельной поверхностью и низкой насыпной плотностью [10]. ТГ состоит из пакетов в десятки-сотни графеновых слоев, что позволяет надеяться – такой материал будет обладать хорошими смазывающими свойствами.

**Углеродные нанотрубки (УНТ).** УНТ это протяженные структуры в виде полого цилиндра, образованные графеновыми слоями. Многослойные УНТ состоят из нескольких графеновых слоев, либо вложенных один в другой, либо навитых на общую ось. Расстояние между слоями составляет 0,34 нм, что соответствует расстоянию между слоями в кристаллическом графите. Величина удельной поверхности достигает 200–600 м<sup>2</sup>/г [11]. Учитывая особенности формы и структуры УНТ можно предположить их перспективность в качестве смазывающих добавок.

**Дисульфид молибдена.** Гексагональные кристаллы MoS<sub>2</sub> обладают слоистой структурой. Твердость дисульфида молибдена по шкале Мооса 1,0–1,5. У него очень высокая химическую стабильность, при этом он устойчив к воздействию большинства кислот и к радиоактивному излучению. В вакууме разлагается на молибден и серу при 1100°C [5], а на воздухе на MoO<sub>3</sub> и SO<sub>2</sub> при температуре выше 450 °С.

Смазывающие свойства дисульфида молибдена обеспечивает его кристаллическая структура: связи Ван-дер-Ваальса между слоями серы позволяют последним свободно двигаться, в результате чего трение уменьшается. С другой

стороны, ионные связи между Mo и S придают слоям высокую прочность, так что они способны противостоять продавливанию со стороны микровыступов трущихся поверхностей. В смазочном слое толщиной 2,5 мкм содержится 4000 слоев (S–Mo–S). Слои серы, образующие поверхность кристалла дисульфида молибдена, обеспечивают сильную адгезию к поверхности металла. По антифрикционным свойствам дисульфид молибдена существенно превосходит графит. В отличие от графита дисульфид молибдена является хорошим смазочным материалом даже в глубоком вакууме [1].

**Металлосодержащие наполнители.** Смазочные свойства значительно улучшаются при введении в их состав порошков металлов, их оксидов или солей. Смазки с такими добавками образуют на поверхности трения слои из мягкого металла, которые называют металлоплакирующими [12]. Формирование на поверхности трения металлоплакирующей пленки понижает коэффициент трения и уменьшает износ. Высокая смазочная способность смазок с порошками металлов, например меди, основана на вдавливании ее частиц в неровности поверхности трения. Это увеличивает площадь контакта. Однако в процессе трения происходит быстрое истирание пленок из мягкого металла. По эффективности действия в смазках (особенно при длительных испытаниях) порошки мягких металлов и их оксиды уступают MoS<sub>2</sub> и графиту. Применяют порошки меди в сочетании с графитом и дисульфидом молибдена, как правило, в резьбовых смазках, где они играют роль герметизирующего и антифрикционного материала. Существенно улучшает смазочную способность смазок смесь графита с медной пудрой [12].

В данной работе были созданы и изучены смазки на основе полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 и нанокомпозитов: диоксидов кремния, титана и циркония. Эти системы проявляют хорошие высокотемпературные свойства и механическую стабильность [7, 8]. Использование таких загустителей в данной дисперсионной среде вызывает необходимость улучшения смазывающих свойств путем введения в композицию различных твердых добавок (так называемых высокодисперсных наполнителей), а именно: дисульфида молибдена, графита, терморасширенного графита, углеродных нанотрубок, смеси нанопорошков меди и углерода [13].

### Экспериментальная часть

Для получения смазок в качестве дисперсной фазы использовали нанокомпозиты ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, синтезированные на основе высокодисперсного пирогенного кремнезема SiO<sub>2</sub> «А-380» (КОЭЗ ИХП НАН Украины) с удельной поверхностью ( $S_{уд}$ ) 362 м<sup>2</sup>/г, масло ПЭС-5 (ГОСТ 13004-77) и наполнители: нанотрубки (ООО «ТМСпецмаш»  $S_{уд}$ =220 м<sup>2</sup>/г), терморасширенный графит (ООО «ТМСпецмаш»  $S_{уд}$ =20 м<sup>2</sup>/г), дисульфид молибдена (ТУ 48-19-133-90), графит С-1 (ТУ 113-08-48-63-90), смеси нанопорошков меди и углерода.

Нанокомпозиты с содержанием 2 и 5% ZrO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> были получены методом химического модифицирования. Синтез ZrO<sub>2</sub>(5%)/SiO<sub>2</sub> проводили в стеклянном двугорлом реакторе с пропеллерной мешалкой и обратным холодильником. В реактор помещали 19,84 г ацетилацетоната циркония (IV) (Aldrich, >98% Zr(acac)<sub>4</sub>), затем добавляли 1,6 дм<sup>3</sup> CCl<sub>4</sub>. Выдерживали полчаса до полного растворения реагента. После этого добавляли 95 г А-380, предварительно прокаленного при 550 °С для удаления адсорбированной воды и органических примесей. С помощью ротационного испарителя отгоняли растворитель CCl<sub>4</sub>. Образцы просушивали в течение 2 ч при 100 °С с целью полного удаления CCl<sub>4</sub>, затем прокаливали по 0,5 ч. при температурах

150, 200, 300, 400 и 500 °С. Для получения  $ZrO_2(2\%)/SiO_2$  использовали 7,94 г  $Zr(acac)_4$  и 98 г А-300.

$TiO_2/SiO_2$  синтезировали по методике описанной выше. Для получения нанокompозита с содержанием диоксида титана 2 и 5% в реактор помещали 9,11 г и 22,78 г раствора титан-диизопропоксид-бис(ацетилацетоната) (DuPont, 75% раствор  $Ti(acac)_2OiPr_2$  в изопропанол) соответственно, и добавляли 1,5 дм<sup>3</sup> изопропанола. После этого засыпали 98 г и 95 г А-380 соответственно. Состав и удельная поверхность образцов приведены в табл.1.

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики кремнеземов, модифицированных диоксидами титана и циркония.

Образец	$C_{MO_2}$ , % масс.	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
$TiO_2(2\%)/SiO_2$	2	314
$TiO_2(5\%)/SiO_2$	5	297
$ZrO_2(2\%)/SiO_2$	2	300
$ZrO_2(5\%)/SiO_2$	5	279

*Примечание.*  $C_{MO_2}$  – содержание  $TiO_2$  или  $ZrO_2$ ,  $S_{уд}$  – удельная поверхность.

Медьсодержащие металлоплакирующие наполнители для введения в смазочные композиции получали двумя методами. Нанокompозит состава  $C/Cu/SiO_2$  – 45,6/9,1/45,3 % масс. синтезировали пиролизом смеси фенолформальдегидной смолы, ацетата меди и кремнезема А-300 в токе аргона при температуре 800 °С, по методике описанной в работе [14]. Нанокompозит состава  $C/Cu$  – 90,6/9,4 % масс. получали пиролизом в токе аргона при температуре 800 °С резорцинформальдегидной смолы, синтезированной золь-гель методом в присутствии ацетата меди.

Рентгенофазовый анализ (РФА)  $TiO_2/SiO_2$  и  $ZrO_2/SiO_2$  проводили методом порошковой дифрактометрии при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-3М («Буревестник», Россия) в диапазоне углов  $2\theta$  от 10 до 70 град. Использовали излучение  $CuK_\alpha$  линии анода с никелевым фильтром в отраженном пучке и геометрией съемки по Брэггу–Брентано. Удельную поверхность полученных образцов измеряли методом низкотемпературной десорбции аргона. Термические исследования выполняли на дериватографе Q-1500D фирмы MOM (Венгрия) в температурном интервале 20–1000 °С со скоростью нагрева образца 10 °С/мин.

Смазки получали путем диспергирования загустителей и наполнителей в ПЭС-5 при комнатной температуре с последующей гомогенизацией, при этом смесь масла, кремнеземного нанокompозита и различных добавок четырежды пропускали через гомогенизатор – лабораторные вальцы.

Измеряли показатель пенетрации ( $P$ ) смазок (ГОСТ 5346), по которому смазки были разделены по классам: 1 – слабоструктурированные системы, 2 – пластичные смазки, 3 – высоковязкие смазки и 4 – твердые пасты. Пенетрация измеряется в числах  $P$  по глубине погружения конуса определенной стандартной формы и массы в смазку под воздействием силы тяжести в течение стандартизованного времени 5 с при температуре 25°С.

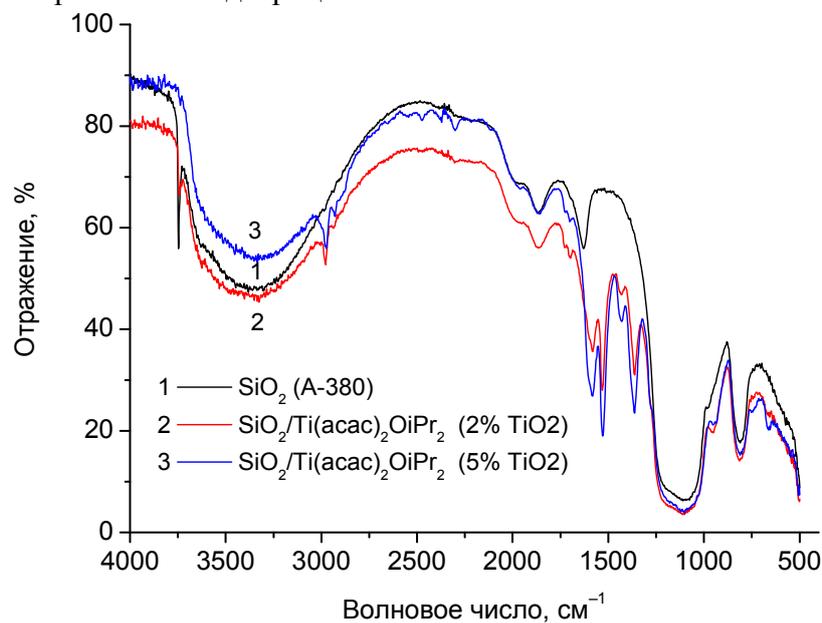
Исследование смазочных свойств проводили на четырехшариковой машине (ЧШМ) трения. В данной работе были рассмотрены два важнейших показателя: нагрузка сваривания и диаметр пятна износа при нагрузке 40 кг.

Нагрузку сваривания ( $P_{св}$ ) определяли как наименьшую нагрузку, при достижении которой происходит схватывание пар трения.

Диаметр пятна износа ( $D_{из}$ ) определяли с помощью микроскопа с ценой деления не менее 0,02 мм. Измерения осуществляли при остановке ЧШМ при достижении максимальных показателей силы трения.

### Результаты и их обсуждение

**Синтез  $TiO_2/SiO_2$ ,  $ZrO_2/SiO_2$ .** На рис.1 приведены ИК-спектры кремнезема, модифицированных  $Ti(acac)_2OiPr_2$ . С повышением содержания  $Ti(acac)_2OiPr_2$  в образцах на ИК-спектрах наблюдается уменьшение интенсивности полосы поглощения силанольных групп при  $3750\text{ см}^{-1}$  и одновременное увеличение интенсивности полос колебаний, которые относятся к ацетилацетонатным и изопророксидным группам модификатора:  $C=O$ ,  $C=C$  ( $1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ ) и  $C-H$  ( $2900\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ ). В ИК-спектре образца  $SiO_2/Ti(acac)_2OiPr_2$  (5%  $TiO_2$ ) поглощение при  $3750\text{ см}^{-1}$  полностью отсутствует (рис.1, кривая 3). Это свидетельствует о том, что все ОН-группы принимают участие в образовании поверхностных адсорбционных комплексов.



**Рис. 1.** ИК-спектры: 1 – кремнезем А-380; 2, 3 – А-380, модифицированный  $Ti(acac)_2OiPr_2$  из расчета 2 и 5 % масс.  $TiO_2$ .

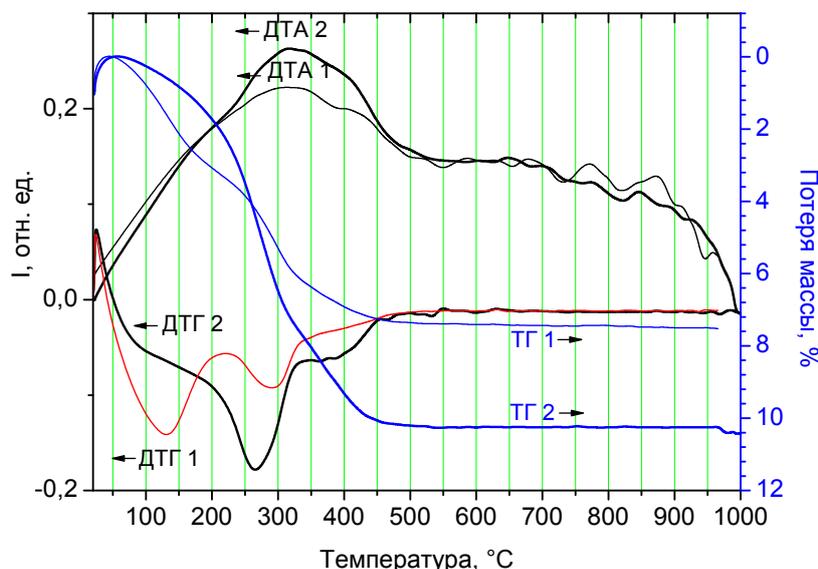
Данные термического анализа и термогравиметрии образцов кремнезема, модифицированного  $Ti(acac)_2OiPr_2$ , приведены на рис. 2. Для всех образцов деструкция ацетилацетонатных и изопророксидных лигандов на поверхности  $SiO_2$  сопровождается экзотермическими эффектами в температурном интервале  $250\text{--}400\text{ °C}$  (кривые ДТА 1, 2), интенсивность которых зависит от содержания  $Ti(acac)_2OiPr_2$ .

С повышением содержания  $Ti(acac)_2OiPr_2$  в образцах наблюдается увеличение потерь массы в температурном интервале  $50\text{--}450\text{ °C}$  (рис. 2, кривые ТГ 1,2). Кроме того, кривые ДТГ 1, 2 показывают несколько стадий термодеструкции углеродного окружения атомов титана, интенсивность максимумов которых увеличивается с ростом концентрации модификатора в образцах. Нагревание образцов выше температуры  $500\text{ °C}$  не приводит к изменению массы образцов, поэтому эта температура была выбрана для финальной обработки и получения нанокомпозитов  $TiO_2/SiO_2$ .

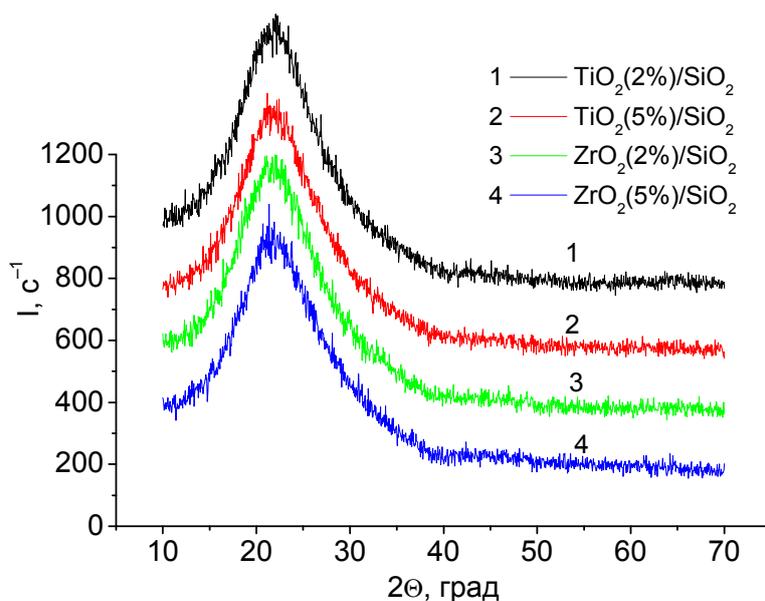
Модифицирование пирогенного кремнезема  $Zr(acac)_4$  подробно изучено нами в работе [15].

При увеличении  $C_{MO_2}$  ( $M = Ti, Zr$ ) в образцах  $S_{y,d}$  уменьшается незначительно (табл. 1).

Исследование строения титан- и цирконийсодержащих кремнезёмов методом рентгенофазового анализа показало, что на поверхности кремнезёма  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  находятся в рентгеноаморфном состоянии (рис. 3).



**Рис. 2.** Термограммы образцов кремнезёма, модифицированного  $\text{Ti}(\text{асас})_2\text{OiPr}_2$ . Содержание в пересчете на  $\text{TiO}_2$ : 1 – 2 % масс., 2 – 5 % масс.



**Рис. 3.** Дифрактограммы нанокompозитов  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ , прокаленных при  $550^\circ\text{C}$ .

**Испытание смазок.** Результаты исследований образцов кремнезёмных смазок, приведены в табл. 2.

Раньше нами было показано, что нанесение на поверхность кремнезёма диоксидов титана и циркония уменьшает загущающую способность полученных нанокompозитов при диспергировании в ПЭС-5. [8]. Так для получения смазок примерно одинаковой вязкости Si10 и SiTi4 (класс P IV) необходимо 10 % А-380 и 20 %  $\text{TiO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$  соответственно (табл. 2).

Чтобы выяснить влияние наполнителя на смазывающие свойства, загуститель и наполнитель брали в количестве 18 и 2 % масс. соответственно. ТРГ сильно загущает

ПЭС-5, поэтому для получения смазок с его участием, количество загустителя уменьшали до 11 % масс.

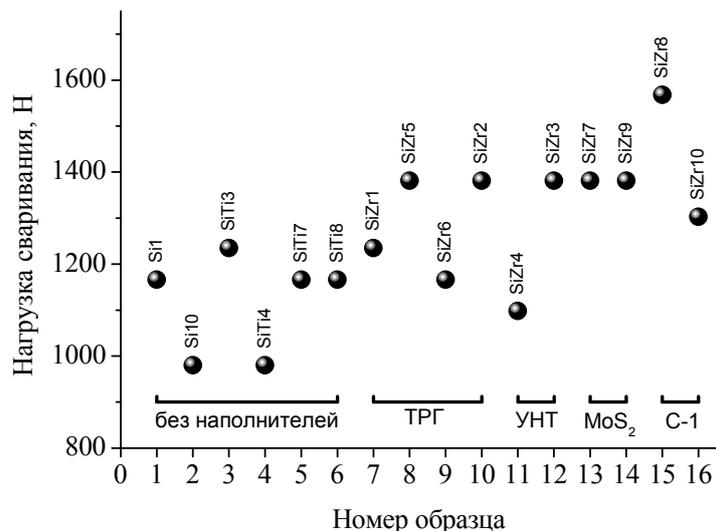
Оценивая характеристики, полученные на четырехшариковой машине трения, композиций на основе  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$  можно сделать вывод, что все материалы требуют добавления твердых наполнителей для улучшения смазочных свойств. Действительно, ТГ, УНТ и  $\text{MoS}_2$  улучшают смазочные свойства – нагрузка сваривания увеличивается до 1381 Н (рис. 4, табл. 2). Лучший результат – 1568 Н получен при использовании добавки графита марки С-1. Таким образом, наблюдается улучшение смазывающих свойств композитов при использовании всех исследованных добавок и уровень этого улучшения примерно одинаков.

**Таблица 2.** Состав и результаты испытаний кремнеземных смазок.

№	Название	Состав загустителя	$P$ , $\text{м} \cdot 10^{-4}$	Класс пенетрации	Результаты ЧШМ	
					$P_{св}$ , Н	$D_{из}$ , мм
1	Si1	5 % А-380	340	I	1166	2,83
2	Si10	10 % А-380	203	IV	980	2,27
3	SiTi3	15 % $\text{TiO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$	279	II	1235	2,98
4	SiTi4	20 % $\text{TiO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$	181	IV	980	2,60
5	SiTi7	15 % $\text{TiO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$	294	II	1166	2,73
6	SiTi8	20 % $\text{TiO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$	180	IV	1166	2,32
7	SiZr1	11 % $\text{ZrO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$ 1 % ТРГ	287	II	1235	2,38
8	SiZr5	11 % $\text{ZrO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$ 2 % ТРГ	260	II	1381	2,63
9	SiZr4	18 % $\text{ZrO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$ 2 % нанотрубки	178	IV	1098	2,16
10	SiZr7	18 % $\text{ZrO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$ 2 % $\text{MoS}_2$	283	II	1381	2,57
11	SiZr8	18 % $\text{SiO}_2(2\% \text{ ZrO}_2)$ 2 % С-1	256	II	1568	2,83
12	SiZr6	11 % $\text{ZrO}_2(2\%)/\text{SiO}_2$ 1 % ТРГ	354	I	1166	2,99
13	SiZr2	11 % $\text{ZrO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$ 2 % ТРГ	339	I	1381	2,64
14	SiZr3	18 % $\text{ZrO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$ 2 % нанотрубки	234	III	1381	2,71
15	SiZr9	18 % $\text{ZrO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$ 2 % $\text{MoS}_2$	354	I	1381	2,93
16	SiZr10	18 % $\text{ZrO}_2(5\%)/\text{SiO}_2$ 2 % С-1	373	I	1303	2,83

Примечание.  $P$  – пенетрация,  $P_{св}$  – нагрузка сваривания,  $D_{из}$  – диаметр пятна износа.

Во всех образцах получили удовлетворительные результаты по параметру диаметр пятна износа (табл. 2) с учетом того, что при измерениях использовалась двойная нагрузка 40 кг (обычно измеряют при нагрузке 20 кг).



**Рис. 4.** Нагрузка сваривания кремнеземных смазок без добавок и с наполнителями различного состава.

**Таблица 3.** Состав и результаты испытаний кремнеземных смазок с металлоплакирующими наполнителями

Образец	Si1	C/Cu-1	C/Cu-2	C/Cu-3	C/Cu/SiO <sub>2</sub> -1	C/Cu/SiO <sub>2</sub> -2	C/Cu/SiO <sub>2</sub> -3
Содержание C/Cu или C/Cu/SiO <sub>2</sub> , %	0	1	2	3	1	2	3
Нагрузка сваривания, $P_{св}$ , Н	1166	1235	1098	1098	1098	1039	1098
Диаметр пятна износа, $D_{из}$ , мм	2,83	2,15	2,23	2,09	1,78	2,45	2,18

Металлоплакирующие наполнители состава C/Cu и C/Cu/SiO<sub>2</sub> испытывали в качестве добавок (1–3 %) в смазки загущенные 7 % А-300. Указанные наполнители не привели к увеличению  $P_{св}$  (табл. 3). Это, по-видимому, связано с тем, что медь в наполнителях блокирована аморфным углеродом, который сам по себе не проявляет противоизносных свойств.

### Выводы

Синтезированы смазки на основе полиэтилсилоксановой жидкости (ПЭС-5), загустителей (модифицированные диоксидами циркония и титана пирогенные кремнеземы) и наполнителей (нанотрубки, дисульфид молибдена, терморасширенный графит, графит марки С-1) и исследованы их трибологические характеристики.

Показано, что добавки ТГ, УНТ, MoS<sub>2</sub> и графита марки С-1 улучшают смазочные свойства.

Работа выполнена при поддержке НАН Украины, научно-технический проект №26-2015.

### Литература

1. Ищук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. – К.: Наукова думка, 1996. – 513 с.
2. Бакалейников М.Б., Сазонова Н.С., Кузнецова Н.В., Петрова Л.Н. Термоокислительная стабильность пластичных смазок// Хим. и технол. топлив и масел. – 1983. – №6. – С. 29–30.

3. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. – М.: Химия, 1988. – 486 с.
4. Сеницын В.В. Пластичные смазки в СССР. – М.: Химия, 1984. – 187 с.
5. Бонер К.Дж. Производство и применение консистентных смазок. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 704 с.
6. Бакалейников М.Б., Сеницин В.В. Свойства силикагелевых пластичных смазок на нефтяных маслах // Хим. и технол. топлив и масел. – 1967. – №3. – С. 50–52.
7. Пат. 99227 Україна, С10М 125/02, С10М 125/10, С10М 125/26. Пластичне мастило // Борисенко Л.І., Мніщенко Г.Г., Борисенко М.В., Картель М.Т., Железний Л.В., Любінін Й.А. – Опубл. 25.07.2012. Бюл. № 14.
8. Борисенко Л.И., Мнищенко Г.Г., Кулик К.С., Петрусь Л.В., Сулим И.Я., Борисенко Н.В. Нанокompозиты диоксидов кремния, титана, циркония и церия – загустители пластичных смазок // Химия, физика и технология поверхности. – 2010. – Т. 1, №1, – С. 111–116.
9. Соболевский М.В., Скороходов И.И., Гриневиц К.П. Олигоорганосилоксаны. – М.:Химия, 1985. – 264 с.
10. Черныш И.Г., Карпов И.Е., Приходько Г.П., Шай В.М. Физико-химические свойства графита и его соединений. – Киев: Наукова думка, 1990. – 200 с.
11. Семенов Ю.И., Мележик А.В., Приходько Г.П., Гаврилюк Н.А., Пятковский М.Л., Янченко В.В. Синтез, структура, физико-химические свойства нанокуглеродных материалов // Физико-химия наноматериалов и супрамолекулярных структур. – 2007.– Т. 2. – С. 116–158.
12. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Свойства и применение металлоплакирующих смазок. М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1985. – 59 с.
13. Кобзова Р.И., Егорова З.Д., Михеев В.А. Противоизносные и противозадирные свойства силикагелевых смазок // Хим. и технол. топлив и масел. – 1973. – №11. – С. 40–42.
14. Galaburda M., Bogatyrov V., Oranska O., Gun'ko V., Skubiszewska-Zięba J., Urubkov I. Synthesis and characterization of carbon composites containing Fe, Co, Ni nanoparticles // J. Therm. Anal. Calorim. – 2015. – V. 122, Iss. 2. – P. 553–561.
15. Борисенко Н.В., Сулим И.Я., Борисенко Л.И. Модифицирование высокодисперсного кремнезема ацетилацетонатом циркония // Теорет. и эксперим. химия. – 2008. – Т.44, №3. – С. 191–195.

## КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ ПОЛІДІЕТИЛСИЛОКСАНУ І МОДИФІКОВАНИХ КРЕМНЕЗЕМІВ: ПОКРАЩЕННЯ МАСТИЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Л.І. Борисенко<sup>1</sup>, С.О. Радзієвська<sup>2</sup>, Д.О. Щербаков<sup>2</sup>, М.В. Борисенко<sup>1</sup>,  
В.М. Богатирьов<sup>1</sup>, І.І. Войтко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України  
вул. Генерала Наумова 17, Київ, 03164, Україна, borysenko@naverex.kiev.ua

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, просп. Комарова 1, Київ, 03058, Україна

*Наноконтрополи TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> і ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> отримані методом хімічного модифікування і досліджені методами рентгенофазового аналізу, термогравіметрії та низькотемпературної десорбції аргону. TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> і ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, що містять 2 і 5 % мас. діоксиду металу, були використані як загущувачі пластичних мастил на основі поліетилсилосану ПЕС-5. Показано, що добавки нанотрубок, дисульфїду молібдену, терморозширеного графіту покращують змащувальні властивості таких композицій.*

## COMPOSITION BASED ON MODIFIED SILICA AND POLYDIETHYLSILOXANE: IMPROVING OF LUBRICATING PROPERTIES

L.I. Borysenko<sup>1</sup>, S.O. Radziievska<sup>2</sup>, D.O. Shcherbakov<sup>2</sup>, M.V. Borysenko<sup>1</sup>,  
V.M. Bogatyrov<sup>1</sup>, I.I. Voitko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine,  
17 General Naumov Str. Kyiv, 03164, Ukraine, e-mail: borysenko@naverex.kiev.ua

<sup>2</sup>National Aviation University, prospekt Komarova 1, Kyiv, 03058, Ukraine

*Nanocomposites of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> were prepared by chemical modification and investigated by X-ray diffraction analysis, thermogravimetry and low-temperature desorption of argon. TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, containing 2 and 5 wt. % metal dioxide, were used as thickeners of greases based on polyethylsiloxane PES-5. It is shown that the additives of nanotubes, molybdenum disulfide and expanded graphite improves the lubricating properties of such compositions.*