

ПОВЫШЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МИКРОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН,
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА, канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,
И.И. ПИЛИПЁНОК*

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены исследования износостойкости пары трения скольжения, эксплуатируемой с использованием комплексной литиевой смазки общего назначения с добавлением микроразмерных компонентов в виде нитрида бора (ИТМОЛ-150Н+3% BN). Вычислены коэффициенты полинома четвертой степени, позволяющие рассчитать величину массового износа и коэффициент трения на любом участке трения. Установлено, что интенсивность изнашивания пары трения скольжения снижается при модифицировании пластичной комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н частицами нитрида бора и ниже традиционно используемой смазки Литол-24 в 4–5 раз.

Ключевые слова: *пластичные смазочные материалы, модифицирующие добавки, массовый износ, транспортные средства.*

Введение. Эксплуатация транспортных и технологических средств в разнообразных условиях использования, таких как повышенная температура, запыленность, агрессивные химические среды и высокая влажность, неизбежно инициирует интенсивное изнашивание узлов и агрегатов машин. Этот процесс не только сокращает их срок службы, но и влечет за собой значительное увеличение расхода топлива и других эксплуатационных материалов, а также рост числа отказов. Последствия износа проявляются в снижении общей эффективности и безопасности работы техники, что приводит к большим экономическим потерям в масштабах промышленности. Износостойкость трибосопряжений – ключевой фактор надежности машин – критически зависит от физико-механических и химических свойств материалов трущихся поверхностей, которые формируются в процессе их взаимодействия. В этом сложном взаимодействии важнейшую роль в формировании оптимальных свойств и обеспечении долговечности узлов трения играет правильно подобранный и высокоэффективный смазочный материал.

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) представляют собой особую категорию смазочных материалов, отличающихся от жидких масел наличием загустителя, иногда наполнителя и стабилизатора. Эта особенность позволяет им эффективно обеспечивать работоспособность подвижных соединений машин и оборудования общего назначения, а также значительно повышать их долговечность в сложных и экстремальных условиях эксплуатации, где жидкие смазки могут быть неэффективны или неприменимы. К таким условиям относятся, например, узлы, работающие с низкими скоростями, высокими нагрузками, при наличии вибраций, а также в условиях, требующих длительного сохранения смазочного слоя или герметизации узла [1–3]. Наряду с расширением области использования пластичных смазочных материалов повышаются запросы, определяемые ростом температуры, нагрузок, скоростью взаимного перемещения деталей и ужесточением других условий их применения. Это связано с тенденциями развития техники, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В настоящее время все большее распространение получает развитие улучшения свойств пластичных смазок введением третьего компонента (добавки) в их состав. Введенные разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения частично остаются в ней и образуют разделяющий слой, снижающий площадь металлического контакта поверхностей [4–6].

В последние годы значительно возрос интерес к модифицированию смазочных материалов. Уменьшение размеров дисперсных включений приводит к качественному изменению их свойств, включая усиление межфазного взаимодействия между компонентами и матрицей смазки, а также к измельчению структуры смазки. Это обеспечивает значительно улучшенные механические и триботехнические свойства, в т.ч. при повышенных температурах и высоких контактных давлениях.

Выбор материалов для тяжело нагруженных узлов трения – сложная задача, предполагающая комплексный подход и зависящая от множества факторов: конструкции узла, условий эксплуатации (температура, нагрузка, скорость, тип движения), заявленного срока службы и экономических соображений. В контексте пластичных смазочных материалов их свойства в значительной степени определяются структурой дисперсной фазы, которая представляет собой сложный каркас, формирующийся в две основные стадии. Первая стадия включает образование первичных мицелл (центров кристаллизации) и их последующий рост до макроассоциатов определенных размеров. Вторая стадия характеризуется взаимодействием этих образующихся макроассоциатов

друг с другом, что приводит к появлению трехмерной объемной структуры, которая и придает смазке ее пластичные свойства. Эффективными модификаторами смазочных материалов являются микроразмерные добавки различной природы, способные влиять на формирование и стабильность этой структуры, а также на ее взаимодействие с трущимися поверхностями.

Широкое распространение получила многоцелевая универсальная антифрикционная комплексная литиевая смазка общего назначения ИТМОЛ-150Н, которая может использоваться как закладная в подшипниках качения закрытого типа. Она работоспособна в интервале температур от минус 40 °С до плюс 160 °С, временно до плюс 180 °С. Изготавливается с использованием в качестве дисперсионной среды индустриального масла И-40А, для загущения которого применяется комплекс из 12-гидроокси-стеариновой, ортоборной и терефталевой кислот, а их нейтрализация осуществляется гидрооксидом лития. Смазка разработана как импортозамещающая пластичная смазка серии ИТМОЛ по цене ниже аналогов на основе местного сырья [7].

Особый интерес представляет применение нитрида бора (BN) в качестве добавки в пластичных смазках. Например, гексагональный нитрид бора *h*-BN обладает уникальными трибологическими свойствами, которые делают его исключительно перспективным для применения в смазочных материалах. К ним относятся: очень низкий коэффициент трения (сравнимый с графитом и дисульфидом молибдена), высокая термическая стабильность (до 1000 °С на воздухе), превосходная химическая инертность, высокая теплопроводность и способность к образованию прочных и скользких защитных пленок на трущихся поверхностях. Ламеллярная структура *h*-BN позволяет частицам легко сдвигаться относительно друг друга, обеспечивая эффект «твердой смазки». Эти пленки могут значительно снижать прямое металлическое соприкосновение, предотвращая схватывание, уменьшая абразивное и адгезионное изнашивание, а также способствуя самовосстановлению поврежденных поверхностей. Введение микроразмерных компонентов, таких как нитрид бора, в состав комплексных литиевых смазок, например, ИТМОЛ-150Н+3% BN, направлено на снижение сопротивления трению и повышение общих эксплуатационных характеристик смазочного материала. Исследования показывают, что такие добавки могут содействовать формированию плотной гомогенной пленки на поверхности, обладающей высокой несущей способностью, и обеспечивать полировку тяжело нагруженных соединений, что в конечном итоге приводит к снижению интенсивности изнашивания и значительному увеличению долговечности узлов трения. Механизм действия микрочастиц BN включает их способность к свободному вращению в смазке, что способствует переходу режима трения скольжения в режим трения качения, а также деформационно упрочить поверхностный слой материалов соединения, повышая их устойчивость к пластическим деформациям и усталости [8].

Поэтому целью данной работы являлись исследования износостойкости пары трения скольжения, эксплуатируемой с использованием комплексной литиевой смазки общего назначения с добавлением микроразмерных компонентов в виде нитрида бора (ИТМОЛ-150Н+3% BN).

Материалы и методы. Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения MMW-1A вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживала в течение эксперимента постоянную нормальную силу на образец с отклонением ± 2 Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала $\pm 2\%$ при жидкостном режиме смазывания.

Исследуемые образцы, моделирующие детали и материалы балансирной подвески транспортного средства были изготовлены из бронзы БрО5Ц5С5 ГОСТ 613-79 и представляли собой ролики диаметром 10 мм и высотой 15 мм. В качестве контртела был выбран диск из закаленной стали 45 диаметром 70 мм и высотой 6 мм. Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производили подготовку поверхности образцов. Для уменьшения шероховатости поверхности трения ее обрабатывали наждачной бумагой зернистостью Р600. Массовый износ образцов Δm (г) определяли на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждых 500 м пути трения. Режимы трения при испытании образцов следующие: давление на поверхности контакта – 3 и 6 МПа; скорость скольжения – 0,1 м/с; путь трения – от 500 до 20 000 м.

В процессе испытаний фиксировали значения силы и коэффициента трения с частотой один раз в секунду с возможностью сохранения в файл. Полученные данные аккумулировали в графическом и текстовом виде и после аппроксимации подвергали анализу.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием различных математических редакторов.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам экспериментальных исследований для полинома четвертой степени (1) были рассчитаны коэффициенты, что позволило определить массовый износ в любой точке пути трения (таблица 1):

$$\Delta m_n = k_1 + k_2 L + k_3 L^2 + k_4 L^3 + k_5 L^4, \quad (1)$$

где L – путь трения, м;

$k_{1,2,\dots,5}$ – коэффициенты полинома;

Δm_n – массовый износ, г.

Таблица 1. – Коэффициенты полинома для пластичных смазочных материалов при расчете массового износа

		Давление, МПа	Коэффициенты			
			k_1	k_2	k_3	k_4
ИТМОЛ-150Н	ролик	3	0,0002	-9×10^{-10}	-1×10^{-13}	3×10^{-17}
		6	-3×10^{-4}	9×10^{-7}	-1×10^{-10}	$6,27 \times 10^{-15}$
	контртело	3	-6×10^{-4}	-2×10^{-7}	3×10^{-11}	$-1,3 \times 10^{-15}$
		6	0,0015	-1×10^{-6}	2×10^{-10}	$-6,9 \times 10^{-15}$
ИТМОЛ-150Н+BN	ролик	3	4×10^{-5}	-2×10^{-8}	2×10^{-11}	$-1,1 \times 10^{-15}$
		6	0,0002	2×10^{-7}	-8×10^{-12}	0
	контртело	3	0,0012	1×10^{-6}	-2×10^{-10}	$5,72 \times 10^{-15}$
		6	-0,013	2×10^{-6}	1×10^{-12}	$-2,7 \times 10^{-15}$
Литол-24	ролик	3	0,003621	$5,354 \times 10^{-4}$	$6,533 \times 10^{-7}$	$2,837 \times 10^{-10}$
	контртело	6	0,003684	$4,773 \times 10^{-4}$	$-5,66 \times 10^{-7}$	$2,408 \times 10^{-10}$

По результатам экспериментальных исследований для полинома четвертой степени (2) были рассчитаны коэффициенты, что позволило определить коэффициент трения в любой точке пути трения (таблица 2):

$$f_n = k_1 + k_2 L + k_3 L^2 + k_4 L^3 + k_5 L^4, \quad (2)$$

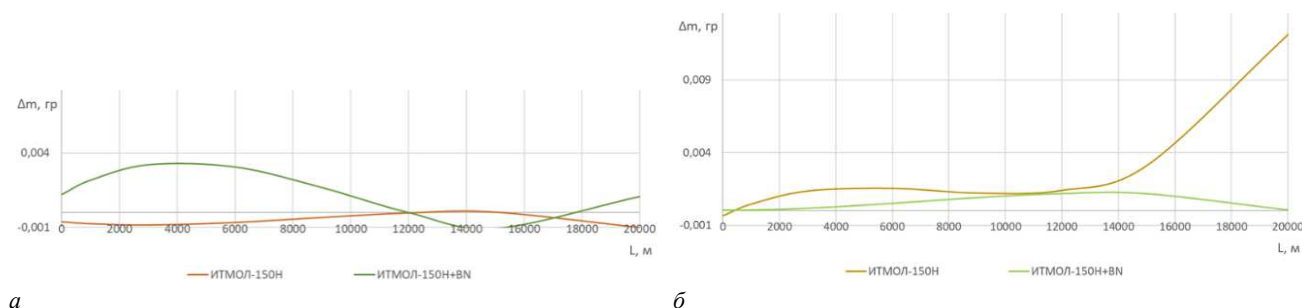
где f_n – коэффициент трения.

Таблица 2. – Коэффициенты полинома для пластичных смазочных материалов при расчете коэффициента трения

Пластичный смазочный материал	Давление, МПа	Коэффициенты				
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
И-50	3	0,028	$-3,1 \times 10^{-6}$	$7,697 \times 10^{-10}$	$-6,65 \times 10^{-14}$	–
	6	0,041	$1,85 \times 10^{-6}$	$-6,862 \times 10^{-9}$	$5,426 \times 10^{-13}$	–
ИТМОЛ-150Н	3	0,022	$-3,5 \times 10^{-6}$	$8,39 \times 10^{-10}$	$-6,774 \times 10^{-14}$	–
	6	0,029	$-7,9 \times 10^{-6}$	$2,457 \times 10^{-9}$	$2,254 \times 10^{-13}$	–
ИТМОЛ-150Н с 3,0% BN	3	0,029	$-4,9 \times 10^{-6}$	$1,454 \times 10^{-9}$	$-1,185 \times 10^{-13}$	–
	6	0,037	$-1,1 \times 10^{-5}$	$3,148 \times 10^{-9}$	$-2,449 \times 10^{-13}$	–
Литол-24	3	0,003621	$5,354 \times 10^{-4}$	$-6,533 \times 10^{-7}$	$2,837 \times 10^{-10}$	$4,103 \times 10^{-14}$
	6	0,003684	$4,773 \times 10^{-4}$	$-5,66 \times 10^{-7}$	$2,408 \times 10^{-10}$	$-3,424 \times 10^{-14}$

Полученные графические зависимости массового износа от пути трения показывают, что введение микроразмерных компонентов в виде нитрида бора в комплексную литиевую смазку ИТМОЛ-150Н снижает массовый износ как самого образца из бронзы, так и контртела из стали 45 при различных режимах нагружения (рисунки 1 и 2).

Из рисунка 1, а следует, что при давлении 3 МПа массовый износ со смазкой ИТМОЛ-150Н+3% BN сочетается с периодом приработки и увеличивается на пути трения до 12 000 м, затем снижается и сопоставим с износом со смазкой ИТМОЛ-150Н. При давлении 6 МПа массовый износ до 12 000 м практически не отличается, а затем для образца, работающего с комплексной литиевой смазкой, начинает значительно увеличиваться.

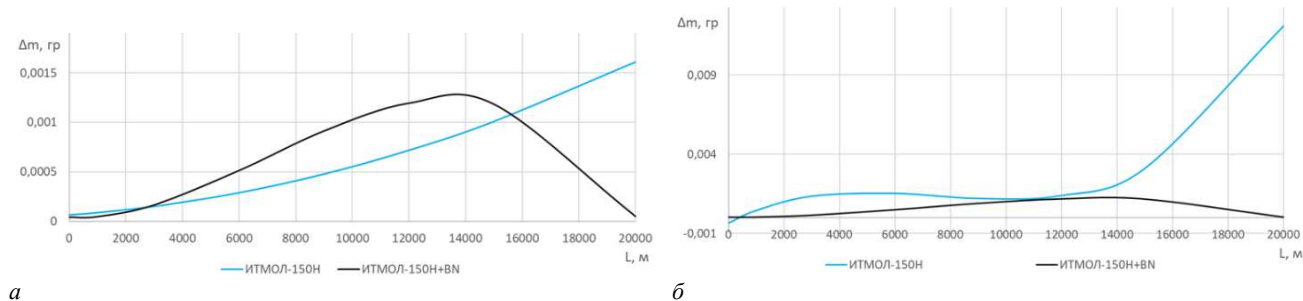


а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 1. – Зависимость массового износа контртела Δm от пути трения L

Для образцов, изготовленных из бронзы, явно заметно снижение массового износа при эксплуатации со смазкой с добавлением нитрида бора для различных режимов нагружения (рисунок 2). При давлении 3 МПа износ увеличивается до пути трения 14 000 м, что можно объяснить вытеснением смазочного материала из зо-

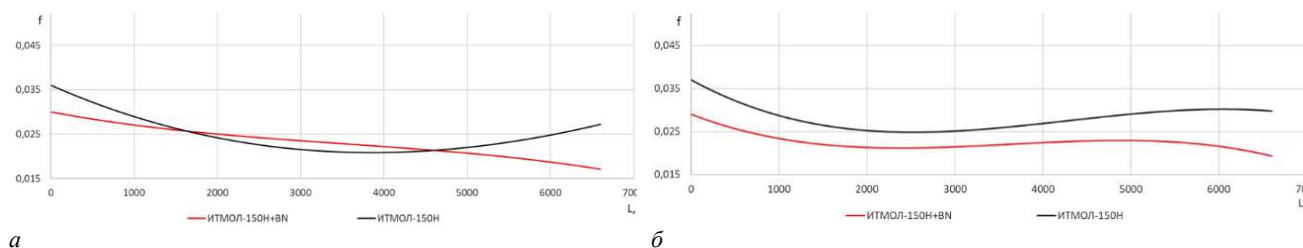
ны трения и явно выраженной приработкой, а затем снижается и менее массового износа образца со смазкой ИТМОЛ-150Н на 30–40% (рисунок 2, а). При давлении 6 МПа на всем пути трения массовый износ образцов для ПСМ с добавлением нитрида бора меньше, чем с обычной комплексной литиевой смазкой, а явно выраженной области приработки не наблюдается.



а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 2. – Зависимость массового износа ролика Δm от пути трения L при давлении

Полученные графические зависимости коэффициента трения от пути трения при различных режимах нагружения коррелируют с графическими зависимостями массового износа от пути трения (рисунок 3). Минимальный коэффициент трения наблюдается для комплексной литиевой смазки с нитридом бора ($f = 0,030–0,033$). Период приработки для указанных ПСМ выражен незначительно, и он осуществляется на промежутке до 2000 м пути трения образца.



а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 3. – Зависимость коэффициента трения f от пути трения L для различных смазочных материалов и давлении

Если сравнивать величину интенсивности изнашивания пары трения скольжения с традиционно используемой смазкой Литол-24, то можно увидеть, что величина износа при ее использовании в 4–5 раз выше, чем с предлагаемыми комплексными литиевыми смазками ИТМОЛ-150Н и с добавлением нитрида бора ИТМОЛ-150Н+3% BN (рисунок 4).

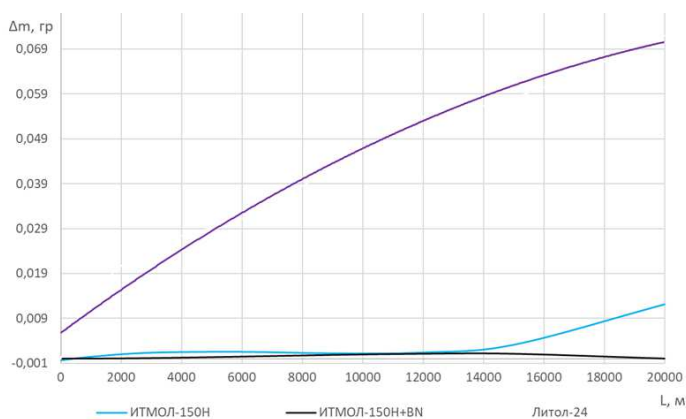


Рисунок 4. – Зависимость массового износа ролика Δm от пути трения L при давлении 6 МПа

Таким образом, модифицирование смазочных материалов частицами нитрида бора приводит к качественному изменению их свойств, что обеспечивает значительно улучшенные триботехнические свойства, в т.ч. при повышенных температурах и высоких контактных давлениях.

Заключение. На основе проведенных исследований установлено, что улучшение свойств пластичных смазок может быть достигнуто введением в ее состав модифицирующих добавок. Проведенные триботехнические испытания свидетельствуют о высоком уровне антифрикционных и противоизносных свойств предложенных смазочных материалов в условиях высоких удельных нагрузок. Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжело нагруженных деталей балансирной подвески трехосных грузовых автомобилей МАЗ, подтвердили снижение величины износа пар трения при использовании комплексной литевой смазки с добавлением нитрида бора. Интенсивность изнашивания пары трения с традиционно используемой смазкой Литол-24 в 4–5 раз выше, чем с предлагаемыми комплексными литевыми смазками. Также для исследуемых пластичных смазочных материалов на основании полученных экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты полинома 4-й степени, позволяющие рассчитать массовый износ и коэффициент трения на любом участке пути трения

ЛИТЕРАТУРА

1. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильющенко и др.; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука. 2013. – 381 с.
2. Алимова З.Х. Махамаджанов М.И. Экологическая безопасность при использовании горюче-смазочных материалов / Теория и практика современной науки. – 2021. – № 11(77). – С. 12–16.
3. Алимова З.Х. Пути улучшения свойств смазочных материалов, применяемых в транспортных средствах. – Ташкент: Vneshinvestprom, 2020. – 125 с.
4. Пластичные смазки, модифицированные графеном / Э.Т. Крижевская, М.И. Сентюрихина, Р.В. Бартко и др. // Мир нефтепродуктов. – 2020. – № 6. – С. 62–63.
5. Иванов В.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В. Триботехническое модифицирование поверхностей узлов трения в технике // Актуальные проблемы развития экономики и управления в современных условиях: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. / Москва (10 нояб. 2021 г.) // Моск. экон. ин-т. – М.: МЭИ, 2021. – С. 328–336.
6. Структура и свойства комплексной сульфонат-кальциевой смазки / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник и др. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 1(42). – С. 44–50.
7. Жорник В.И. Пластичные смазочные материалы с бинарной дисперсной фазой для тяжело нагруженных узлов трения // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 358.
8. Исследование структурных особенностей нитрида бора после механоактивации в атриторе и планетарной мельнице / В.Т. Сеньют, С.А., Ковалева, Т.В. Гамзелева и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24, № 2. – С. 169–175.

REFERENCES

1. Vityaz', P.A., Zhornik, V.I., Il'yushchenko, A.F. & Senyut', V.T. (2013). *Nanoalmazhy detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primenenie*. Minsk: Belarus. navuka. (In Russ.).
2. Alimova, Z.Kh. & Makhamadzhanov, M.I. (2021). Ekologicheskaya bezopasnost' pri ispol'zovanii goryuche-smazochnykh materialov [Environmental safety in use flammable lubricants]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki*, 11(77), 12–16. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Alimova, Z.Kh. (2020). *Puti uluchsheniya svoystv smazochnykh materialov, primenyaemykh v transportnykh sredstvakh*. Tashkent: Vneshinvestprom. (In Russ.).
4. Krizhevskaya, E.T., Sentyurikhina, M.I., Bartko, R.V. & Danilov, A.M. (2020). Plastichnye smazki, modifitsirovannye grafenom [Graphene-modified plastic lubricants]. *Mir nefteproduktov [World of Petroleum Products]*, (6), 62–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Ivanov, V.P., Dudan, A.V. & Vigerina, T.V. (2021). Tribotekhnicheskoe modifitsirovaniye poverkhnostey uzlov treniya v tekhnike. In: *Aktual'nye problemy razvitiya ekonomiki i upravleniya v sovremennykh usloviyakh: sb. materialov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 10 noyab. 2021 g.* (328–336). Moscow: MEI. (In Russ.).
6. Zhornik, V.I., Ivakhnik, A.V., Ivakhnik, V.P. & Zapol'skii, A.V. (2018). Struktura i svoystva kompleksnoi sul'fonat-kal'tsievoi smaz-ki [Structure and Properties of Complex Sulfonate Calcium Greases]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of machines, mechanisms and materials]*, 1(42), 44–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Zhornik, V.I. (2014). Plastichnye smazochnye materialy s binarnoi dispersnoi fazoi dlya tyazhelonagruzhennykh uzlov treniya. In: *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 12-i Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.*: in 4 vol. Vol. 1 (358). Minsk: BNTU. (In Russ.).
8. Senyut', V.T., Kovaleva, S.A., Gamzeleva, T.V. & Grigor'eva, T.F. (2016). Issledovanie strukturnykh osobennostey nitrida bora posle mekhanoakti-vatsii v attritore i planetarnoi mel'nitse. *Khimiya v interesakh ustoichi-vogo razvitiya*, 24(2), 169–175. (In Russ.).

Поступила 11.07.2025

**INCREASING THE ANTIFRICTION PROPERTIES OF PLASTIC LUBRICANT
BY MODIFYING WITH MICROSIZED ADDITIVES**

V. IVANOV, A. DUDAN, T. VIGERINA, S. PILIPENKO, I. PILIPENOK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents studies of wear resistance of a sliding friction pair operated with a general-purpose complex lithium grease with the addition of micro-sized components in the form of boron nitride (ITMOL-150N+3% BN). The coefficients of the fourth-degree polynomial are calculated, allowing to calculate the value of mass wear and the friction coefficient at any friction section. It is established that the wear intensity of the sliding friction pair decreases with modification of the plastic complex lithium grease ITMOL-150N with boron nitride particles, and is 4-5 times lower than the traditionally used grease Litol-24.

Keywords: plastic lubricants, modifying additives, mass wear, vehicles.