Rodionov Yury – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Skomorokhova Anastasia – Student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov, e-mail: nasta373@mail.ru.

Nikitin Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov.

Galkin Pavel – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov.

Filatov Ivan – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov.

Поступила в редакцию (Received): 30.04.2020 Принята к публикации (Accepted): 17.06.2020

УДК 631.362.34

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-3-97-102

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК ГРАФИТОВЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ И ИХ РАБОТЫ В МЕХАНИЗМАХ

¹Остриков Валерий Васильевич
²Vigdorowitsch Michael
¹Сазонов Сергей Николаевич
¹Забродская Алла Владимировна

 1 ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» 2 Angara GmbH

Реферат. Пластичные смазки, работающие в подшипниках скольжения, подвержены действию высоких нагрузок и температур. Для повышения эксплуатационных свойств в смазки добавляют высокодисперсные нерастворимые в маслах вещества – наполнители. Однако до настоящего времени отсутствуют однозначные подходы и теоретические обоснования процессов, происходящих в смазках и объясняющих эффект образование пленок от действия трибопрепаратов, наполнителей с учетом их специфических особенностей и т.д. Получено уравнение, объясняющее в определенной степени причину по которой смазки с графитовым наполнителем не нашли широкого применения в высокоточной технике, в которой вследствие малых допусков возникают значительные, не гасящиеся вторичными факторами силы. Из-за большого количества слоев монотонно возрастающая функция обеспечивает значительное мультиплицирующее воздействие на нижний слой, трансформируя тангенциальное воздействие нормальное через вандерваальсовые связи кристаллической решетки. В результате приложения достаточно значительной внешней силы нижний слой может отрываться от металлической поверхности, преодолевая силы адгезии. Получено выражение, характеризующее критическое значение давления в паре трения, при которой происходит отрыв фрагмента пленки для смазки с графитовым наполнителем. Элементарная 2D-ячейка ячейка графита охватывает два атома, постоянная решётки графита a=0.246 нм. На основании теоретических предпосылок получено выражение для определения числа узлов в «отрываемом» фрагменте пленки. Единственным варьируемым параметром в полученном уравнении является количество слоев, связанных с толщиной пленки. Зная энергию связи 1 моля пленки и ее толщину можно вычислить давление отрыва.

Ключевые слова: пластичная смазка, графит, углерод, слой, кристаллическая решетка, пленка, вандерваальсовые связи, давление, узел трения.

THEORETICAL ASPECTS OF EVALUATING THE RINSING EFFICIENCY OF THE ICE LUBRICATION SYSTEM FROM POLLUTION

¹Ostrikov Valery ²Vigdorowitsch Michael ¹Sazonov Sergeyy ¹Zabrodskaya Alla

¹FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture" ²Angara GmbH

Abstract. Greases running in plain bearings are subject to high loads and temperatures. Highly dispersed oil-insoluble substances - fillers are added to lubricants to increase operational properties. However, to date, there are no unambiguous approaches and theoretical justifications of the processes occurring in lubricants and explaining the effect of film formation from the action of tribological preparations, fillers, taking into account their specific features, etc. An equation is obtained that explains, to a certain extent, the reason why lubricants with graphite filler are not widely used in high-precision technology, in which, due to small tolerances, significant forces that are not quenched by secondary factors arise. Due to the large number of layers, a monotonically increasing function provides a significant multiplying effect on the lower layer, transforming the normal tangential effect through the van der Waals bonds of the crystal lattice. As a result of the application of a sufficiently significant external force, the lower layer can break away from the metal surface, overcoming the adhesion forces. An expression is obtained characterizing the critical value of pressure in a friction pair at which a fragment of a film for lubrication with a graphite filler breaks off. An elementary 2D cell, a graphite cell covers two atoms, the lattice constant of a graphite is a = 0.246 nm. The expression for determining the number of nodes in the "torn off" film fragment is obtained on the basis of theoretical assumptions. The only variable parameter in the resulting equation is the number of layers associated with the film thickness. Knowing the binding energy of 1 mole of the film and its thickness, the separation pressure can be calculated.

Keywords: grease, graphite, carbon, layer, crystal lattice, film, van der Waals bonds, pressure, friction unit.

Основная часть. Пластичные смазки в узлах трения сельскохозяйственной техники работают при высоких нагрузках. В процессе механического воздействия на смазку часть связей в ней разрушается и после прекращения (остановки) компенсационная структура полностью не восстанавливается, являясь тиксолабильной системой. Однако из-за наличия в смазках большого числа менее прочных, но более лабильных связей к практически мгновенному восстановлению, сплошность слоя смазки не нарушается [1, 2].

Для повышения эксплуатационных свойств рассматривается возможность модификации товарных смазок специальными присадками, добавками и наполнителями [3, 4].

Как известно, присадки обладают свойствами поверхностно — активных веществ, что предопределяет их активность в объеме смазки и на границе раздела дисперсной фазы с дисперсной средой [1].

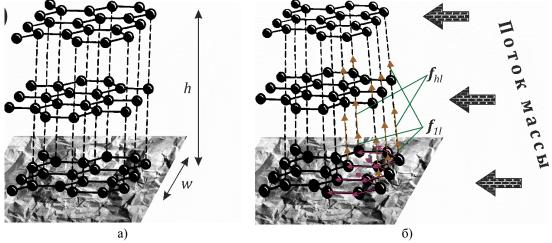
Другой важной составляющей, входящей в состав смазок, являются высокодисперсные, нерастворимые в маслах вещества, не образующие в смазках коллоидной структуры, но улучшающие эксплуатационные свойства смазок. К таким веществам относят дисульфид молибдена, сульфиды некоторых металлов, полимеры, оксиды и комплексные соединения металлов, графит и т.д., которые обычно замешивают в готовую смазку в количестве от 1 до 30 %. Подобного рода наполнители вводят в основном в смазки, работающие в тяжелонагруженных узлах трения подшипников скольжения [1, 5].

Достаточно спорными остаются вопросы использования графитовых и графеновых элементов в качестве добавок к смазкам для повышения их противоизносных свойств [6, 7]. При всех имеющих место противоречиях существуют различные теоретические подходы и результаты практических исследований, которые как подтверждают, так и отрицают имеющиеся представления.

Частицы графита, будучи добавленными в пластичную смазку, в ходе приработки пары металл - металл заполняют и сглаживают микронеровности рабочих поверхностей смазываемых деталей, формируя на них пленку [8]. Использование графитовых смазок, как правило, ограничено низкоскоростными механизмами и узлами, не относящимися к числу высокоточных. Существует практика использования поляризованного графита вместо обычного, что преследует цель повышения адгезии смазки к металлическим поверхностям. Очевидно, что адгезия в случае графита обусловлена вандерваальсовыми силами, поскольку при этом не происходит ни химических реакций, ни внедрения в кристаллическую решетку подложки.

Кристаллическая решетка графита относится к числу гексагональных и состоит из компланарных слоёв, образованных правильными шестиугольниками с атомами углерода в вершинах. В наиболее часто встречающейся аллотропной модификации графита, атомы углерода каждого слоя расположены на уровне центров шестиугольников соседних (нижнего и верхнего) слоёв, т.е. каждый слой оказывается упорядоченно сдвинут относительно другого. При этом каждый второй слой позиционируется эквивалентно предыдущему. Каждый атом углерода в пределах одного слоя связан ковалентными связями с тремя соседними атомами. Связи между слоями традиционно рассматриваются как обусловленные вандерваальсовыми силами [9], что в целом характерно для минералов с гексагональной решёткой в пределах одного слоя, хотя имеются дискуссионные соображения относительно отличающейся природы таких связей [10]. Последнее, однако, не влияет на дальнейшее рассмотрение, поскольку энергия межслойной связи в любом случае вдесятеро меньше энергии гексагональной связи [11]. Вследствие этого, графит обладает резко анизотропными характеристиками. Так, предел прочности при сжатии наиболее высок и составляет 70-100 МН/м², при растяжении 12,5-20,0 МН/м², при статическом изгибе 20,0 — 38,0 МН/м²

На рисунке 1a с известной степенью условности представлена структура графитовой плёнки на металлической подложке. Первый (нижний) слой вследствие адгезии удерживает всю плёнку на металлической подложке.



а) в отсутствии внешних сил; б) в присутствии внешних сил, обусловленных потоком массы внутри функционирующего узла/механизма.

Векторы: f_{ll} — нормальная компонента внешней силы, приложенной к каждому узлу каждого слоя, вдоль вандерваальсовой связи (показаны для двух первых слоёв), f_{hl} — суммарная по всем слоям, кроме первого, нормальная компонента внешней силы, приложенной к каждому узлу каждого слоя, действующая на 1-й слой.

Рисунок 1 – Графитовая плёнка на металлической подложке (показаны 3 слоя)

На рисунке 16 представлена система при наличии нагрузки вследствие потока массы. Возникают внешние силы F, действующие на каждый слой. Первоначально приложенные к крайним узлам, они в виде тангенциальных компонент F_t передаются по ковалентным связям

вдоль всей решётки. В силу наибольшей прочности в данной конструкции именно ковалентных связей и наибольшей стойкости решётки в отношении сжатия, тангенциальные компоненты оказывают на решётку действие лишь в виде сдвига слоя, деформация же гексагональных ячеек оказывается пренебрежимо мала. Иначе обстоит ситуация с нормальными (по отношению к усреднённо горизонтальной поверхности подложки) компонентами внешних сил. Они прикладываются к узлам в направлении вандерваальсовых связей.

Сила, действующая на каждый узел нижнего слоя, может быть условно представлена суммой двух сил $-f_{ll}$, изначально приложенной именно к самим узлам в пределах отдельного слоя, и f_{hl} суммы сил, приложенных к узлам вышележащих слоёв, с которыми связан вандерваальсовыми силами вдоль всей вертикали плёнки данный узел нижнего слоя. Вводя обозначения $F_{ll} = \sum f_{ll}$ и $F_{hl} = \sum f_{hl}$, где суммирование осуществляется по всем узлам в пределах нижнего слоя,

запишем разложение внешних сил на тангенциальную и нормальную компоненты в пределах кристаллической решётки:

$$F = F_{\tau} + F_{n},\tag{1}$$

где $F_n = F_{1l} + F_{hl}$, что означает рассмотрение с этого момента уравнения (1) применительно к первому слою (для вышележащих слоёв суммирование по ещё более вышележащим слоям даст меньшую сумму $\sum f_{hl}$). Присваивая нижнему слою индекс «0» и обозначив полное число вышележащих слоев через k, введём функцию-мультипликатор m(k), определённую для целочисленных $k \ge 1$:

$$F_{hl} = m(k)F_{1l} \tag{2}$$

Мы исходим из того, что $F_{hl}\langle\sum F_{1l}$, поскольку неизбежно происходит передача некоторой компоненты сил в тангенциальном направлении вследствие неидеальной ортогональности тангенциального и нормального базисных направлений по причине искривления решётки под воздействием внешней силы. Тангенциальная компонента сил в итоге оказывается мала, т.к. благодаря эластичности нормальных связей происходит конвертация тангенциального воздействия в нормальное. С учётом уравнения (2), для нормальной компоненты действующей на нижний слой силы получаем уравнение:

$$F_{n} = [1 + m(k)]F_{1/2} \tag{3}$$

Уравнение (3) объясняет в определенной степени причину, по которой графитовые смазки не нашли применения в высокоскоростных механизмах и высокоточной технике, в которой вследствие малых допусков возникают значительные, не гасящиеся вторичными факторами силы. Из-за большого количества слоёв k монотонно возрастающая функция m(k) обеспечивает значительное мультиплицирующее воздействие на нижний слой, трансформируя тангенциальное воздействие в нормальное через вандерваальсовы связи кристаллической решётки. В результате приложения достаточно значительной внешней силы нижний слой отрывается от металлической подложки, преодолевая силы адгезии. Отрыв начинается с того края одного из многочисленных линейных дефектов (дислокаций) металлической подложки, который расположен со стороны действия внешней силы. При этом в рамках используемой здесь механистической аналогии, отрыв графитовой плёнки проводится постепенно вдоль всей её длины (в случае плёнки — до следующей дислокации, где плёнка, возможно, рвётся).

Найдём критическое значение давления в механизме или узле, при котором происходит отрыв фрагмента графитовой плёнки. Площадь боковой поверхности плёнки, испытывающей действие внешней силы, равна $S = hw = (h_0 + kh_1)w$ (рисунок 1a), где $h_1 = 0.3354 \mu M$ нм – межслоевое расстояние кристаллической решётки графита, h_0 – расстояние от нижнего слоя до усреднённой поверхности подложки. При критическом давлении P_c , приводящем к отрыву плёнки, имеет место равенство:

$$E_{ad} = (h_0 + kh_1) \cdot l \cdot w \cdot P_c, \tag{4}$$

где l — линейный размер фрагмента графитовой плёнки. В связи с однородности направлений, можно положить $l \sim w$ и далее вместо их произведения использовать усреднённый по поверхности подложки квадрат линейного размера дислокации (w^2) . Энергия адгезионной связи E_{ad} отрываемого фрагмента плёнки равна:

$$E_{ad} = E_{ad}^{mole} \frac{N}{N_A}, \tag{5}$$

где N – число узлов в отрываемом фрагменте плёнки, $N_{\rm A}$ – число Авогадро, $E_{ad}^{\ \ mole}$ – энергия адгезионной связи 1 моля атомов углерода в плёнке. Элементарная 2D-ячейка графита охватывает 2 атома, постоянная решётки графита $a_0=0,246$ нм. Следовательно, число узлов в отрываемом фрагменте плёнки равно $N=\frac{2(w^2)}{a_0^2}$. С учётом вышесказанного, преобразуем уравнение (4) к виду:

$$P_c = \frac{2E_{ad}^{mole}}{N_A a_0^2} \frac{1}{(h_0 + kh_1)} \tag{6}$$

Единственным варьируемом параметром в уравнении (6) является количество слоёв k, связанных с толщиной плёнки. Если знать энергию связи 1 моля плёнки и её толщину, можно вычислить давление отрыва.

Вывод. Данная теоретическая оценка в первом приближении позволяет определить эффективность действия металоплакирующих добавок к пластичным смазкам. При этом, как показывают результаты практических исследований и проверок трибопрепаратов, наполнителей, образование тонких пленок на поверхности трения сопряжено и зависит не только от усилия сдвига и нагрузок, но и критических температур, возникающих при определенных условиях работы механизма, времени работы смазки и от формирования пленки.

Под действием высоких температур происходит сглаживание микровыступов и заполнение микротрещин, когда температура в паре трения (на микроучастках) достигает температуры плавления металла. Создание пленки достаточно сложный процесс с. Установлены факты, когда под действием трибопрепарата температура в узле трения, заполненного смазкой с добавками на 15...20 °C ниже чем в аналогичных условиях работы смазки без добавок и наполнителей. Снижение температуры в узле трения способствует замедлению окислительных процессов в смазке и продлению срока ее службы.

Список литературы

- 1. Школьников В.М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение.— Москва: Техинформ, 1999. 596 с.
 - 2. Ищюк Ю.Л. Состав, структура и войства пластичных смазок. Киев: Наукова думка, 1996. 512 с.
 - 3. Фукс И.Г. Добавки к пластичным смазкам. М.: Химия. 1982. 248 с.
 - 4. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. М.: Химия. 1991. 240 с.
 - 5. Братков А.А. Теоретические основы химмотологии. М.: Химия. 1985. 316 с.
- 6. Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю. Повышение эффективности действия ремонтновосстановительных составов // Наука в центральной России. 2013. –№ 5. С. 30-35.
- 7. Сафонов В.В. Наноструктурные материалы в качестве компонентов смазочных композиций. Саратов: СГАУ. 2006. 324 с.
- 8. Чалых А.Е. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. М.: Металлургия. 1972 432 с.
 - 9. Зайцев О.С. Общая химия. Состояние веществ и химические реакции. М: Химия, 1990. С. 160.
- 10. Ordin S.V., Sharupin B.N. and Fedorov M.I., Semiconductors J. Normal lattice vibrations and the crystal structure of anisotropic modifications of boron nitride // FTP. 1998. 32(9). P. 924—932.
- 11. Климчицкая Г.Л., Мостепаненко В.М. Успехи и проблемы в изучении сил Ван-дер-Ваальса и Казимира. // Труды Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – 2015№. – 1(517). – С. 144-171.

References

- 1. SHkol'nikov V.M. Topliva, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primenenie.– Moskva: Tekhinform, 1999. 596 s.
 - 2. Ishchyuk YU.L. Sostav, struktura i vojstva plastichnyh smazok. Kiev: Naukova dumka, 1996. 512 s.
 - 3. Fuks I.G. Dobavki k plastichnym smazkam. M.: Himiya. 1982. 248 s.
 - 4. Zaslavskij YU.S. Tribologiya smazochnyh materialov. M.: Himiya. 1991. 240 s.
 - 5. Bratkov A.A. Teoreticheskie osnovy himmotologii. M.: Himiya. 1985. 316 s.
- 6. Ostrikov V.V., Zimin A.G., Popov S.YU. Povyshenie effektivnosti dejstviya remontnovosstanovitel'nyh sostavov. //. Nauka v central'noj Rossii. 2013. –№ 5. S. 30-35.
- 7. Safonov V.V. Nanostrukturnye materialy v kachestve komponentov smazochnyh kompozicij-Saratov: SGAU. 2006. 324 s
- 8. CHalyh A.E. Tekhnologiya i oborudovanie elektrodnyh i elektrougol'nyh predpriyatij. M.: Metallurgiya. 1972-432 s.
 - 9. Zajcev O.S. Obshchaya himiya. Sostoyanie veshchestv i himicheskie reakcii. M: Himiya, 1990. S. 160.
- 10. Ordin S.V., Sharupin B.N. and Fedorov M.I., Semiconductors J. Normal lattice vibrations and the crystal structure of anisotropic modifications of boron nitride // FTP. 1998. 32(9). P. 924—932.
- 11. Klimchickaya G.L., Mostepanenko V.M. Uspekhi i problemy v izuchenii sil Van–der– Vaal'sa i Kazimira. // Trudy Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo. 2015№. 1(517). C. 144-171.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, доцент, врио директора Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, е -mail: viitinlab8@bk.ru

Вигдорович Михаил Владимирович – доктор физико-математических наук, директор Angara GmbH, Дюссельдорф, Германия, e-mail:dr.vigdorowitsch@angara-gmbh.de.

Сазонов Сергей Николаевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственнго бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snsazon@mail.ru.

Забродская Алла Владимировна — научный сотрудник Федерального государственнго бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, е-mail: viitinlab8@bk.ru.

Author credentials Affiliations

Ostrikov Valery – Full Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Director of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Vigdorowitsch Michael – Full Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of Angara GmbH, Dusseldorf, Germany, e-mail:dr.vigdorowitsch@angara-gmbh.de.

Sazonov Sergey – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: snsazon@mail.ru.

Zabrodskaya Alla – Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Поступила в редакцию (Received): 12.05.2020 Принята к публикации (Accepted): 17.06.2020