

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ГРАФИТОВОЙ СМАЗКИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Д. А. Ю. Аль-Саади¹, В. Ф. Першин¹,
Б. Н. Салимов², С. А. Монтаев²

Кафедра «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; pershin.home@mail.ru (1); Западно-Казахстанский
аграрно-технический университет имени Жангир хана,
г. Уральск, Казахстан (2)

Ключевые слова: графеновые наноструктуры; коэффициенты трения;
режимы движения; сдвиг.

Аннотация: Проанализированы возможности механоактивации графитовых смазок в высокоскоростных планетарных мельницах. Данна характеристика основных режимов движения мелящих шаров и материала в поперечном сечении помольного барабана, совершающего планетарное движение. Приведены результаты экспериментальных исследований режимов движения и отмечена аналогия с режимами движения шаров и материала в шаровых мельницах. Основное внимание уделено характеру воздействия мелящих шаров на материал, подвергающийся механоактивации. Рассмотрены условия создания больших сдвиговых напряжений в зонах контакта материала с мелящими шарами. Проведены эксперименты по механоактивации графитовых смазок при разных режимах. Определены основные характеристики механоактивированных смазок, а также влияние этих смазок на трение при скольжении двух плоскостей.

Введение

Согласно ГОСТ 3333–80, графитовая смазка – грубая плотная мазь черного цвета с серебристым оттенком [1]. Старое наименование смазки «графитная УСсА». По составу смазка близка к синтетическим солидолам, но приготовлена на более вязком масле и содержит графит. Смазку загущают мылами синтетических жирных кислот, получаемых окислением парафина и петролатума (в отношении 9:1). В последние годы выпускают графитовую смазку с пониженными пределом прочности и вязкостью. Графитовую смазку употребляют круглогодично в рессорах, торсионных подвесках гусеничных машин, открытых шестернях и др. Она сходна по свойствам с синтетическим солидолом. Для приготовления ее заменителя в солидол, нагретый не выше 50 °C, добавляют 10 % графита. Данная смазка широко применяется для пуска и приработки трущихся поверхностей двигателей внутреннего сгорания (поршней и цилиндров), в различных гидроустановках, при эксплуатации канатов, для смазывания муфт больших размеров, работающих в тяжелых режимах и т.д.

Несмотря на обширный диапазон практического применения графитовых смазок, нет единой рецептуры и технологии их производства. В [1] отмечено, что смазка должна изготавливаться в соответствии с требованиями настоящего стандар-

та по технологии, которая применялась при изготовлении образцов смазки, прошедших испытания с положительными результатами и допущенных к применению в установленном порядке. Там же приводятся требования и нормы к внешнему виду, температуре каплепадения, пенетрации при 25 °С с перемешиванием, коллоидной стабильности, пределу прочности на сдвиг, вязкости, процентному содержанию воды и коррозионному воздействию на металл. Однако и эти нормы не относятся ко всем видам смазки, поскольку для графитовых смазок, используемых в гидроустановках, требования существенно отличаются.

Коллоидальный графит в присутствии масла в результате адсорбции образует на трущихся поверхностях пленку, проникает и удерживается даже в мельчайших неровностях и порах металла [2]. Данный факт позволяет сделать предположение о том, что при уменьшении размера частиц графита и особенно его слойности, то есть фактически при образовании графеновых структур, отмеченный эффект существенно усиливается. Различные формы графеновых нанопластинок (**ГНП**) получают путем эксфолиации (расщепления) кристаллического, обычного природного, интеркалированного, расширенного графитов. Независимо от исходного материала и метода его предварительной обработки, наиболее часто эксфолиацию проводят под действием ультразвука в водном растворе поверхностноактивных веществ (**ПАВ**), органических растворителей, иногда в ионных жидкостях. Ультразвуковая эксфолиация легко осуществляется в лабораторных условиях, но в промышленном производстве становится узким местом, ограничивающим производительность, поскольку обработка подвергаются очень разбавленные дисперсии (концентрация графита 0,1...0,5 %). Альтернативой ультразвуку является механоактивация в планетарной мельнице. Эксфолиацию графита проводят в различных средах, например в органических растворителях [3], водном растворе додецилсульфоната натрия [4] или в присутствии добавок ПАВ (додецилсульфат или додецилбензолсульфонат натрия) [5].

В работе [6] графит размалывали в шаровой мельнице с меламином. Результаты анализа полученного продукта противоречивы и не позволяют сделать однозначный вывод о возможности получения малослойных графеновых структур данным методом. Наибольший интерес представляет работа [7], в которой описан метод эксфолиации графита путем размола в планетарной мельнице кристаллического графита и твердой углекислоты. В данном случае механическая обработка сопровождается не только эксфолиацией графита, но и химическим взаимодействием молекул диоксида углерода с оборванными связями атомов углерода графеновых слоев с образованием карбоксильных групп.

В конечном результате после термической обработки получены графеновые пленки практически без дефектов, обладающие лучшей электропроводностью, чем полученные через окись графита. Учитывая приведенные выше результаты, можно сделать вывод о том, что механическая обработка в планетарных мельницах позволяет получать как графеновые материалы, так и графенсодержащие нанокомпозиты. В результате механоактивации графитовой смазки в ней образуются графеновыеnanoструктуры, повышающие эксплуатационные характеристики, в том числе уменьшающие коэффициент трения.

Экспериментальные исследования движения сыпучего материала и мелящих шаров во вращающемся барабане

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1) с независимыми приводами вращения водила и помольных барабанов [8]. Помольные барабаны 1 совершают планетарное движение за счет привода 3 водила 2 и привода независимого вращения барабанов 4. Вращение от привода 4 осуществляется за счет фрикционных валков 5 и 6. Диаметр помольных барабанов 120 мм, скорость вращения водила изменяется от 100 до 1100 мин⁻¹. Привод 4

обеспечивает существование основных режимов движения мелящих шаров и материала в поперечном сечении помольного барабана: периодических обрушений; циркуляционного; водопадного; закритического [9 – 11].

Качественный анализ процесса движения сыпучего материала в поперечном сечении барабана планетарной мельницы проводили по фотоснимкам вращающихся помольных барабанов с прозрачными торцевыми стенками. В качестве примера на рис. 2, представлена сравнение циркуляционного режима движения сыпучего материала в гладком вращающемся барабане (рис. 2, а) и помольном барабане планетарной мельницы (рис. 2, б). Характеры распределения и движения сыпучего материала в поперечных сечениях барабанов аналогичны. То же самое можно сказать и относительно водопадного режима движения (рис. 2, в, г). В общем случае при воздействии мелящих шаров на частицы обрабатываемого материала действуют нормальные и касательные усилия, в результате чего в материале возникают нормальные

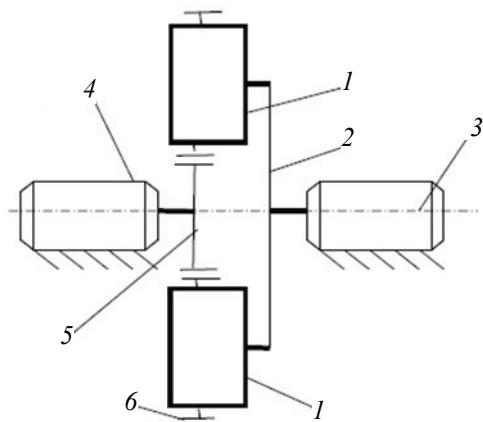


Рис. 1. Схема лабораторной установки

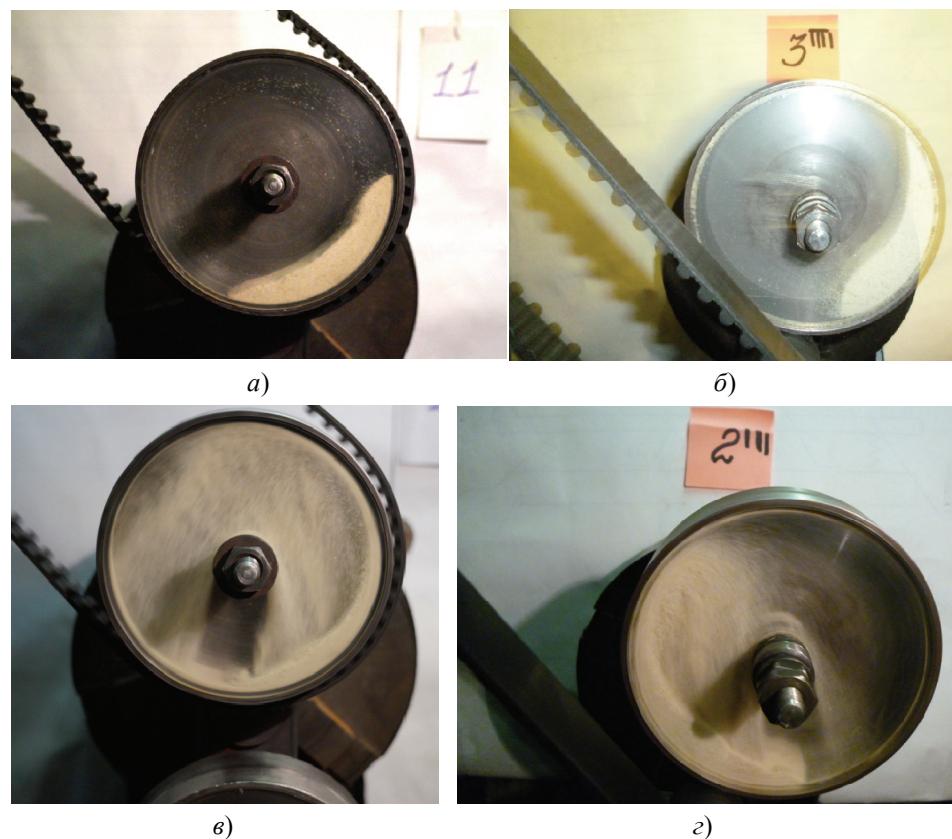


Рис. 2. Циркуляционный и водопадный режимы движения сыпучего материала:
а, в – гладкий вращающийся барабан; б, г – помольный барабан планетарной мельницы

и касательные напряжения. Одни исследователи считают, что за изменение размеров, формы и механических свойств отвечают только нормальные напряжения [12, 13], другие, наоборот, – что сдвиговая компонента воздействия мелящих тел на материал является более эффективной, чем нормальная [14].

Проведено исследование движения мелящих шаров в барабанной и планетарной мельницах. В экспериментах использовали стальные шары диаметром 5 мм и шары из двуокиси циркония диаметром 3 мм. Установлено, что распределения сыпучего материала и мелящих шаров в помольном барабане планетарной мельницы аналогичны, однако при анализе движения мелящих шаров обнаружено периодическое проскальзывание всей загрузки относительно обечайки барабана. Поскольку часть обрабатываемого материала находится между шарами и обечайкой, при проскальзывании в частицах этой части материала возникают максимальные касательные напряжения. Действие напряжений приводит к сдвигу слоев графита относительно друг друга и, в конечном итоге, уменьшению слойности графита. При многократных воздействиях не исключено образование малослойных ГНП. С увеличением диаметра шаров их проскальзывание относительно обечайки учащается, размеры частиц измельченного материала становятся больше. Принято решение загружать в помольный барабан шары двух разных диаметров для того, чтобы увеличить проскальзывание и одновременно уменьшить размер частиц конечного продукта.

Механоактивация графитовой смазки в планетарной мельнице

На первом этапе в качестве исходного материала использовали серийно выпускаемую графитовую смазку, которую вместе с мелящими шарами загружали в помольные барабаны, включали приводы вращения и проводили механоактивацию в течение определенного времени. В процессе экспериментов изменяли: диаметр мелящих шаров от 3 до 12 мм; вес загрузки шаров от 50 до 100 г и исходного материала от 5 до 25 г; скорость вращения водила от 100 до 1100 мин⁻¹ и помольных барабанов относительно собственных осей от 10 до 400 мин⁻¹. Данные диапазоны изменения скоростей вращения позволяли обеспечить центробежные ускорения в зоне контакта мелящих шаров с материалами до 150g (g – ускорение свободного падения) и движение материала и шаров в режимах периодических обрушений, циркуляционном и водопадном. Время механоактивации изменялось от 10 до 120 мин.

Результаты механоактивации оценивали по внешнему виду, температуре каплепадения, пенетрации, коллоидной стабильности, пределу прочности на сдвиг, вязкости, процентному содержанию воды и коррозионному воздействию на металл [1]. Используя микроскоп с увеличением 900×, делали снимки исходного и механоактивированного материалов. В качестве примера на рис. 3 представ-

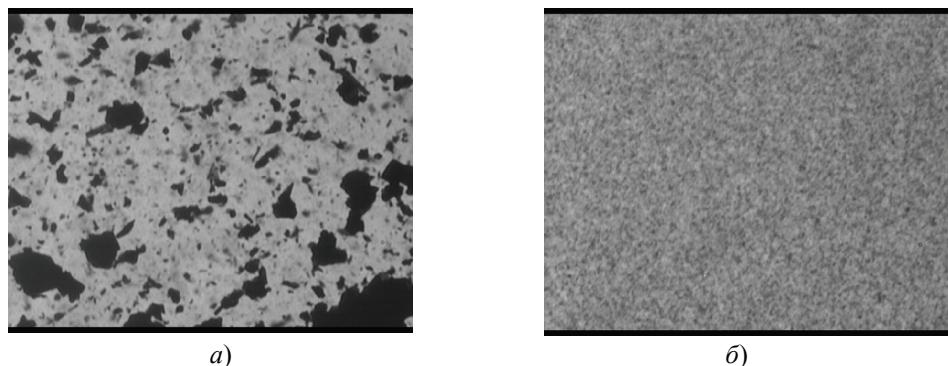


Рис. 3. Фотоснимки исходной графитовой (а) и механоактивированной (б) смазок

лены фотоснимки стандартной графитовой смазки (см. рис. 3, а) и обработанной в планетарной мельнице (см. рис. 3, б). Попытки определить спектры комбинационного рассеяния (СКР) с помощью спектрометра комбинационного рассеяния DXR Raman Microscope ThermoScientific не дали результатов, что связано с высокой молекулярной интенсивностью солидола и его большим содержанием в смазке (порядка 90 %).

Экспериментальное определение коэффициентов трения скольжения

Поскольку результаты проведенных анализов механоактивированной графитовой смазки не позволяют сделать однозначный вывод об образовании графеновых структур, принято решение о проведении исследований по определению коэффициентов трения «сталь по стали» при использовании традиционной графитовой и механоактивированной смазок. Определение коэффициентов трения осуществляли на специально изготовленной установке, схема которой представлена на рис. 4.

Установка состоит из тележки 3, которая гибким тросиком 7, через блок 8 соединена с гирей 9, установленной на электронных весах 10. На тележку 3 закреплялась плита 4, где установлена пластина 5. Плита 4 и пластина 5 изготовлены из стали, для которой определялся коэффициент трения скольжения. Пластина 5 гибким тросиком 2 соединена с лебедкой 1. Для создания определенной силы прижатия пластины 5 к плате 4 на пластину устанавливалась гиря 6.

Эксперименты по определению коэффициентов трения проводили следующим образом. На пластину 5 устанавливали гирю 6 с определенным весом P , включали лебедку и фиксировали показания весов 10. Сдвигающее усилие G определяли как разность веса гири 9 и текущих показаний весов. Коэффициент трения скольжения f рассчитывали по формуле

$$f = \tau / \sigma,$$

где $\sigma = N/A$ – нормальные напряжения, N – сила нормального давления, равная суммарному весу гири 6 и пластины 5, A – площадь зоны трения; $\tau = G/A$ – касательные напряжения.

В процессе эксперимента изменяли силу N от 1,24 до 12,03 Н, скорость движения тележки от 0,05 до 0,3 м $^{-1}$. Для каждого сочетания параметров проводили по 10 опытов. Полученные результаты обрабатывали по стандартным статистическим методикам. Коэффициенты трения скольжения определяли с традиционной графитовой и механоактивированной смазками. В таблице 1 приведены характерные усредненные результаты для трения «сталь по стали».

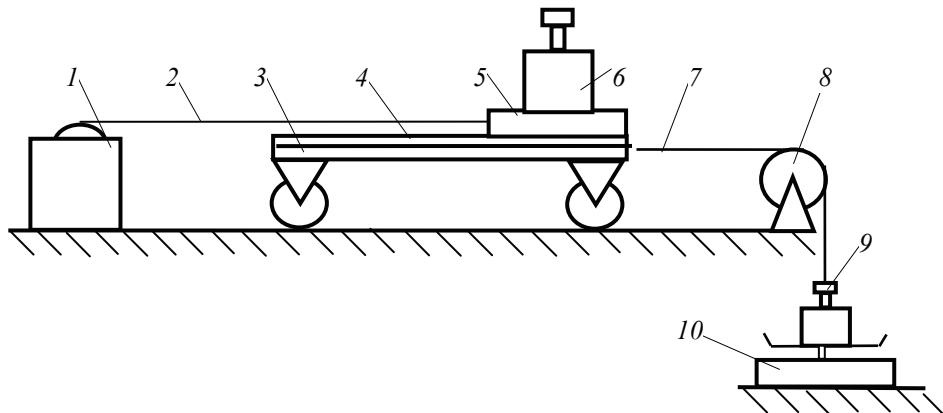


Рис. 4. Схема установки для определения коэффициентов трения

Таблица 1

Характерные усредненные результатами для трения «сталь по стали»

$\sigma \cdot 10^{-3}$, Па	Смазка			
	стандартная		механоактивированная	
	$\tau \cdot 10^{-3}$, Па	f	$\tau \cdot 10^{-3}$, Па	f
0,64	0,106	0,166	0,081	0,126
1,14	0,197	0,173	0,145	0,127
1,64	0,275	0,168	0,203	0,124
2,14	0,360	0,168	0,274	0,128
2,64	0,456	0,173	0,330	0,125
3,14	0,551	0,175	0,396	0,126
3,64	0,633	0,174	0,455	0,125
4,14	0,712	0,172	0,526	0,127
4,64	0,776	0,167	0,585	0,126
5,14	0,873	0,170	0,653	0,127
5,64	0,952	0,169	0,711	0,126
6,14	1,043	0,170	0,767	0,125

Среднее значение коэффициента трения скольжения для стандартной смазки – 0,17; механоактивированной – 0,126. В результате механоактивации коэффициент трения скольжения при использовании механоактивированной смазки снизился на 20 – 30 %. Для стандартной смазки максимальное отклонение коэффициента трения от среднего значения составляет 3 %, механоактивированной – 1,6 %, то есть механоактивированная смазка работает более стабильно.

В процессе экспериментов изменяли скорость перемещения пластины 5 относительно плиты 4, ее влияния на численное значение коэффициента трения скольжения не обнаружено. Установлено, что коэффициенты трения при использовании механоактивированных смазок на 20 – 30 % ниже, чем у традиционных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-38-50829 мол_нр.

Список литературы

- ГОСТ 3333–80. Смазка графитная. Технические условия. – Введ. 1981–01–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 3 с.
- Berman, D. Graphene: a New Emerging Lubricant / D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant // Materials Today. – 2014. – Vol. 17, No. 1. – P. 31 – 42.
- Damm, C. Quantitative Evaluation of Delamination of Graphite by Wet Media Milling / C. Damm, T. J. Nacken, W. Peukert // Carbon. – 2015. – Vol. 81. – P. 284 – 294.
- Scalable Production of Graphene Sheets by Mechanical Delamination / C. Knieke [et al.] // Carbon. – 2010. – Vol. 48, No. 11. – P. 3196 – 3204.
- Supercapacitor Electrodes Using Nanoscale Activated Carbon from Graphite by Ball Milling / R. Nandhini [et al.] // Materials Letters. – 2012. – Vol. 87. – P. 165 – 168.
- Few-Layer Graphenes from Ball-Milling of Graphite with Melamine / V. Leon [et al.] // Chem. Commun. – 2011. – Vol. 47. – P. 10936 – 10938.
- Edge-Carboxylated Graphene Nanosheets Via Ball Milling / I.-Y. Jeon [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2012. – Vol. 109, No. 15. – P. 5588 – 5593.

8. Пат. 83433 Российская Федерация, МПК⁷ B02C 17/18. Планетарная мельница / Першин В. Ф., Першина С. В., Артемов В. Н., Ткачев А. Г., Ткачев А. М. ; заявитель и патентообладатель ООО «НаноТехЦентр». – № 2009105040/22 ; заявл. 13.02.09 ; опубл. 10.06.09, Бюл. № 16.
9. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа : монография / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с.
10. Дурнев, А. С. Применение теории цепей Маркова к моделированию процесса смешивания в гладком вращающемся барабане/ А. С. Дурнев, В. Ф. Першин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 783 – 792.
11. Селиванов, Ю. Т. Оптимизация процесса приготовления многокомпонентных смесей в циркуляционных смесителях / Ю. Т. Селиванов, Б. Е. Поляков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 312 – 321. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.312-321
12. Courtney, T. H. Process Modeling of Mechanical Alloying (Overview) / T. H. Courtney // Materials Transactions, JIM. – 1995. – Vol. 36, No. 2. – P. 110 – 122.
13. Maurice, D. Milling Dynamics : Part II. Dynamics of a SPEX Mill and a One-Dimensional Mill / D. Maurice, T. H. Courtney // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1996. – Vol. 27A, No. 7. – P. 1973 – 1979.
14. Suzuki, K. Control of Structure and Formation of Amorphous and Nonequilibrium Crystalline Metals by Mechanical Milling (Overview) / K. Suzuki, K. Sumiuama // Materials Transactions, JIM. – 1995. – Vol. 36, No. 2. – P. 188 – 197.

Mechanical Activation of Graphite Lubricant in High-Speed Planetary Mill

D. A. Y. Al-Saadi¹, V. F. Pershin¹, B. N. Salimov², S. A. Montaev²

Department of Mechanical Engineering and Machine Parts, TSTU, Tambov, Russia;
pershin.home@mail.ru (1); West Kazakhstan Agrarian Technical University
named after Zhangir khan, Uralsk, Kazakhstan (2)

Keywords: coefficients of friction; graphene nanostructures; shift; type of movement.

Abstract: The paper analyzes the possibility of mechanical activation of graphite lubricant in high-speed planetary mill. The characteristic of the main modes of the movement of grinding balls and material in the cross section of a grinding drum, which makes the planetary movement, is given. The results of pilot studies of the modes of the movement are given and the analogy of these modes to the modes of the movement of spheres and material in spherical mills is noted. The main attention is paid to the nature of impact of spheres on the material which is exposed to mechanical activation. Conditions of creation of big shift tension in zones of contact of material with spheres are considered. Experiments on mechanical activation of graphite lubricants at the different modes are made. The main characteristics of the mechanical activated lubricants and the influence of these lubricants of friction when sliding two surfaces are determined. It is found that the friction coefficients when using the mechanical activated lubricants are 20–30 % lower than when using traditional lubricants.

References

1. GOST 3333–80. Smazka grafitnaya. Tekhnicheskie usloviya [Grease graphite. Specifications], Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002, 3 p. (In Russ.)

2. Berman D., Erdemir A., Sumant A.V. Graphene: a New Emerging Lubricant, *Materials Today*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 31-42.
3. Damm C., Nacken T.J., Peukert W. Quantitative Evaluation of Delamination of Graphite by Wet Media Milling, *Carbon*, 2015, vol. 81, pp. 284-294.
4. Knieke C., Berger A., Voigt M., Taylor R.N.K., Röhrl J., Peukert W. Scalable Production of Graphene Sheets by Mechanical Delamination, *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 11, pp. 3196-3204.
5. Nandhini R., Mini P.A., Avinash B., Nair S.V., Subramanian K.R.V. Supercapacitor Electrodes Using Nanoscale Activated Carbon from Graphite by Ball Milling, *Materials Letters*, 2012, vol. 87, pp. 165-168.
6. León V., Quintana M., Herrero M. A., Fierro J. L. G., de la Hoz A., Prato M., Vázquez E. Few-Layer Graphenes from Ball-Milling of Graphite with Melamine, *Chem. Commun.*, 2011, vol. 47, pp. 10936-10938.
7. Jeon I.-Y., Shin Y.-R., Sohn G.-J., Choi H.-J., Bae S.-Y., Mahmood J., Jung S.-M., Seo J.-M., Kim M.-J., Chang D.W., Dai L., Baek J.-B. Edge-Carboxylated Graphene Nanosheets Via Ball Milling, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, vol. 109, no. 15, pp. 5588-5593.
8. Pershin V.F., Pershina S.V., Artemov V.N., Tkachev A.G., Tkachev A.M., "NanoTekhTsentr"; *Planetarnaya mel'nitsa* [Planetary mill], Russian Federation, 2009, Pat. 83433. (In Russ.)
9. Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa : monografiya* [Processing of bulk material in the drum type: monograph], Moscow: Mashinostroenie, 2009, 220 p. (In Russ.)
10. Durnev A.S., Pershin V.F. [Modeling Bulk Solids Mixing in Rotating Drum by Means of the Theory of Markov Chains], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 783-792. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Selivanov Yu.T., Polyakov B.E. [Optimization of Preparation of Multicomponent Mixtures in Circulating Mixers], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 312-321., doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.312-321 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Courtney T.H. Process Modeling of Mechanical Alloying (Overview), *Materials Transactions, JIM*, 1995, vol. 36, no. 2, pp. 110-122.
13. Maurice D., Courtney T.H. Milling Dynamics : Part II. Dynamics of a SPEX Mill and a One-Dimensional Mill, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, vol. 27A, no. 7, pp. 1973-1979.
14. Suzuki K., Sumiuama K. Control of Structure and Formation of Amorphous and Nonequilibrium Crystalline Metals by Mechanical Milling (Overview), *Materials Transactions, JIM*, 1995, vol. 36, no. 2, pp. 188-197.

Mechanische Aktivierung des Graphitschmierens in der planetarischen Hochgeschwindigkeitsmühle

Zusammenfassung: Es sind die Möglichkeiten der mechanischen Aktivierung der Graphitschmieren in den planetarischen Hochgeschwindigkeitsmühlen analysiert. Es ist die Charakteristik der Hauptregimes der Bewegung der Mahlenskugeln und des Materials im querlaufenden Schnitt der die planetarischen Bewegung erfüllenden Mahlenstrommel angegeben. Es sind die Ergebnisse der experimentalen Forschungen der Regimes der Bewegung gebracht und es ist die Analogie mit den Regimes der Bewegung der Kugeln und des Materials in den Kugelmühlen bemerkt. Die Hauptaufmerksamkeit ist dem Charakter der Einwirkung der Mahlenskugeln auf das der mechanischen Aktivierung aussetzenden Material zugeteilt. Es sind die

Bedingungen der Bildung der großen Schiebeanstrengungen in den Zonen des Kontaktes des Materials mit den Mahlenskugeln betrachtet. Es sind die Experimente nach der mechanischen Aktivierung der Graphitschmieren bei verschiedenen Regimes durchgeführt. Es sind die Hauptcharakteristiken der mechanisch aktivierte Schmieren, sowie den Einfluss dieser Schmieren auf die Reibung beim Gleiten der zwei Ebenen bestimmt.

Activation mécanique de la lubrification de graphite au broyeur planétaire à haute vitesse

Résumé: Sont analysées les possibilités de l'activation mécanique de la lubrification de graphite aux broyeurs planétaires à haute vitesse. Est donnée la caractéristique de principaux régimes du mouvement des boules granulantes et du matériel dans une coupe transversale du tambour effectuant le mouvement planétaire. Sont cités les résultats des études expérimentales des régimes du mouvement; est notée l'analogie avec les régimes du mouvement des boules dans les moulins à boules. L'accent est mis sur la nature de l'influence des boules granulantes sur le matériel soumis à l'activation mécanique. Sont examinées les conditions de la création de grandes tensions d'écalages dans les zones de contact avec boules. Sont réalisées des expériences sur l'activation mécanique de la lubrification de graphite à de différents régimes. Sont définies les principales caractéristiques de l'activation mécanique de la lubrification ainsi que l'influence de la lubrification sur la friction lors du glissement de deux plans.

Авторы: Аль-Саади Дар Али Юсиф – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин»; Першин Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; Салимов Бакытжан Нуржанович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело и технология машиностроения»; Монтаев Сарсенбек Алиакбарович – доктор технических наук, директор НИИ, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, г. Уральск, Казахстан.

Рецензент: Гатапова Наталья Цибиковна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
