ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/138

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ РЕЖИМ
АДГЕЗИОННОГО ИЗНОСА, МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹Дудкин И.В., ¹Шилько Е.В., ^{1,2}Попов В.Л.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

Адгезионный износ является сложным, многомасштабным и до сих пор плохо изученным явлением [1-2]. Со времени высокоцитируемой публикации Рабиновича в 1958 году [3] известно, что режим адгезионного износа контролируется соотношением параметров материала, включая модуль упругости, твердость и удельную поверхностную энергию. В недавних работах научных групп J.-F. Molinari и L. Pastewka [4] было показано, что эволюция адгезионного износа может развиваться двумя принципиальными путями: 1) образование и рост частиц износа или 2) пластическая деформация микроконтактов, сопровождающаяся сглаживанием неровностей. Однако в указанных работах рассматривались шероховатости наноскопического масштаба. Поэтому актуальным является понять, насколько универсальны и независимы от параметров взаимодействия режимы износа, впервые формализованные Рабиновичем и подтвержденные численно в работах научных групп J.-F. Molinari и L. Pastewka. Сказанное обосновывает необходимость детального теоретического анализа условий, определяющих реализацию определенного режима износа микромасштабных и мезомасштабных шероховатостей в условиях тангенциального контакта поверхностей. Такое исследование должно осуществляться не на атомистическом, но более высоком масштабном уровне, позволяющем исследовать роль «макроскопических» материальных параметров.

В настоящей работе мы предприняли попытку исследовать детали процесса адгезионного износа в рамках метода дискретных элементов с явным учетом сил адгезии, действующих между поверхностями контактирующих тел. Рассматривалась модельная система, представляющая собой участок зоны контакта двух тел с контактирующими уединенными шероховатостями. Шероховатости полагались имеющими трапециевидную форму. Моделировались условия тангенциального контакта поверхностей. Вертикальное положение верхней и нижней поверхностей модельной системы полагалось фиксированным. По горизонтальной оси к этим поверхностям прикладывались постоянные скорости в противоположных направлениях. Использовались периодические граничные условия по горизонтальной оси.

В рамках применяемой модели упругопластического механического поведения материалов полагается, что до достижения предела текучести механический отклик дискретных элементов описывается моделью Кельвина, за пределами упругости дополнительно к этому протекают процессы релаксации, которые описываются на основе ассоциированной бездилатансионной модели пластического течения с критерием пластичности Мизеса [5]. Потеря сцепления происходит при достижении заданным силовым критерием в паре связанных дискретных элементов некоторого порогового значения. В работе в качестве этого критерия применялся двухпараметрический критерий Друккера-Прагера [5]. Адгезионное взаимодействие несвязанных элементов описывалось на основе модели Дагдейла когезионной зоны, использующей приближение постоянной величины адгезионного напряжения σ_0 , действующего в пределах расстояния δ между поверхностями элементов.

Результаты моделирования показали, что в зависимости от величины адгезионного напряжения σ_0 и значений механических параметров материала поверхностных слоев в результате взаимодействия шероховатостей реализуется один из трех типичных видов разрушения шероховатостей: «Вырывание», «Стачивание» или «Скол».

Для каждой комбинации механических параметров материала определялось свое пороговое значение адгезионного напряжения Дагдейла (σ_0^*), отвечающее смене режима разрушения шероховатости от «вырывания» к «стачиванию». При $\sigma_0 = \sigma_0^*$ размер

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

рассматриваемой шероховатости является критическим, то есть отвечающим границе между режимами адгезионного износа.

В рамках общей формулировки критерия Друкера-Прагера одному значению прочности материала на сдвиг (σ_j) могут соответствовать различные соотношения значений прочности материала на сжатие (σ_c) и отрыв (σ_t). Поэтому в работе анализировалась зависимость критического значения адгезионного напряжения σ_0^* от величины отношения σ_c/σ_t при сохранении постоянного значения σ_j . Результаты этого исследования графически показаны на рисунке 1. Можно видеть, в частности, что критическое значение адгезионного напряжения является убывающей функцией параметра $a = \sigma_c/\sigma_t$. В первом приближении эту зависимость можно рассматривать как линейную. Более того, в области $a > 2,3$ смена режима разрушения шероховатости не наблюдается.

Рис. 1. График зависимости критической адгезионной прочности σ_0^* от параметра a критерия Друкера-Прагера.

Аналитические оценки Рабиновича дают достоверный результат только для «высокопластичных» материалов, неупругое поведение которых обусловлено движением трансляционных дефектов. Динамика этих дефектов, а следовательно, и величина сдвиговой прочности материала достаточно слабо зависят от величины гидростатического давления ($a \sim 1$). В то же время для хрупких материалов или для материалов с высокой исходной дефектностью нормальное давление в силу различных причин вносит ощутимый вклад в разрушение материала, что влияет на изменение границы между режимами стачивания. Следовательно, в аналитическую оценку Рабиновича должна входить не просто сдвиговая прочность в условиях чистого сдвига σ_j , но комбинация сдвиговой прочности и некоторого коэффициента влияния гидростатического давления.

1. S. Wen, P. Huang. Principles of Tribology, 2nd ed. Wiley, 2017. 608 p. ISBN: 978-1-119-21491-5
2. E. Rabinowicz. Friction and Wear of Materials. Wiley, 1995. 336 p. ISBN: 978-0471830849
3. E. Rabinowicz. The effect of size on the looseness of wear fragments // Wear. 1958. V. 2, P. 4–8.
4. R. Aghababaei, D.H. Warner, J.-F. Molinari. Critical length scale controls adhesive wear mechanisms // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 11816. DOI: 10.1038/ncomms11816
5. E.V. Shilko, S.G. Psakhie, S. Schmauder, V.L. Popov, S.V. Astafurov, A.Yu. Smolin. Overcoming the limitations of distinct element method for multiscale modeling of materials with multimodal internal structure // Comp. Mater. Sci. 2015. V. 102. P. 267-285. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.02.026.