

## **Abstract**

### **DYNAMICS OF NONLINEAR ELASTIC OSCILLATORS WITH DRY FRICTION**

*Oscillations of an oscillator with dry friction are considered with a power-law dependence of the restoring force on the displacement of the system. It was found that the damping of the amplitude of the ranges, their number, as well as the duration of the ranges in time, depends on the value of the nonlinearity index and on the amplitudes of the oscillations of the system. Formulas are derived for calculating the amplitudes of the ranges and their duration in time. Examples of calculations are given.*

**Key words:** *free damped oscillations, dry friction, nonlinear elastic oscillator.*

**УДК 621.793; 538.73; 538.9**

### **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛА**

**Спольник А.И., д. физ.-мат. н., проф., Гайдусь А.Ю., к.т.н., доц., Калиберда Л.М., доц.**

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка)*

*Рассмотрены некоторые аспекты адгезионного взаимодействия, которые имеют отношение к процессу трения в узлах механизмов и машин пищевой и перерабатывающей промышленности. В рамках электронной теории конденсированного состояния проанализирована роль межатомного взаимодействия поверхностных атомов твердых тел в процессе адгезии. Проанализировано влияние ряда покрытий на силу трения контактирующих тел. Показано, что адгезию и силу трения значительно уменьшают покрытия из карбидов и нитридов d-переходных металлов IV-VI групп.*

**Введение.** Обеспечение предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности современным и высокотехнологичным отечественным оборудованием является необходимым условием роста конкурентоспособности выпускаемой продукции, сохранения продовольственной безопасности страны и развития экспортного потенциала. Улучшение эксплуатационных

характеристик механизмов и машин для перерабатывающей промышленности обеспечивает возможность производства продуктов питания и переработки сельскохозяйственной продукции с меньшими издержками. Износ деталей узлов трения является одной из основных причин снижения ресурса механизмов и машин перерабатывающей промышленности. Насущной задачей является повышение надежности и снижение эксплуатационных затрат путем разработки новых способов обеспечения работоспособности изделий в течение всего периода эксплуатации.

Физико-химические процессы при трении играют определяющую роль. На сближенных контактных поверхностях возникают адгезионные связи, роль которых в процессе трения очень велика, но недостаточно изучена. *Адгезионное взаимодействие* независимо от температуры характеризует процессы нормального трения (чем выше адгезия, тем выше коэффициент трения) и износа. Адгезия играет существенную роль при эксплуатации деталей узлов трения, особенно деталей, работающих в экстремальных условиях -высокие скорости, нагрузки, температуры, плохие условия смазывания трущихся поверхностей. Эти условия зачастую имеют место в механизмах и машинах перерабатывающей промышленности [1].

**Анализ литературных данных.** Из литературы известно, что процесс внешнего трения характеризуется двумя важнейшими факторами: неизбежностью упругой и пластической деформаций поверхностных объемов трущихся тел и их разрушения (механический фактор) и неизбежностью адгезионного взаимодействия поверхностей трения (молекулярный фактор) [2]. Эти факторы тесно взаимосвязаны, и выделить роль одного можно лишь условно. Наиболее слабо изучен вопрос адгезионного взаимодействия. В последние годы этому взаимодействию исследователи стали уделять больше внимания [3], однако ясных представлений о механизме адгезии до сих пор нет.

**Цель работы.** Целью работы является рассмотрение некоторых аспектов адгезионного взаимодействия твердых тел, которые могут оказывать существенное влияние на процесс трения в узлах механизмов и машин.

**Основной материал.** Рассмотрим некоторые аспекты адгезионного взаимодействия твердых тел, которые имеют отношение к механизму явления.

1. Адгезия возникает при столь сильном сближении

поверхностей, когда между ними начинают проявляться силы межатомного взаимодействия. Большую роль при трении играет адгезия, возникающая в результате пространственного перекрытия валентных орбиталей контактирующих поверхностей. Взаимодействие поверхностей при этом может носить химический характер, как при хемосорбции или протекании химической реакции. Характерная энергия связи атома в этом случае на порядок выше, чем при физической адгезии.

Природу химической адгезии, как и других явлений, в основе которых лежит межатомное взаимодействие поверхностных атомов твердых тел, можно понять только в рамках электронной теории конденсированного состояния. Вместе с тем в окончательном виде такая теория еще не создана. Наилучшим образом удастся объяснить наблюдаемые закономерности при использовании концепции конфигурационной локализации [4], которая удачно сочетает положительные стороны атомной и одноэлектроннозонной моделей твердого тела.

2. Движущая сила как физической, так и химической адгезии — стремление системы к минимуму свободной энергии. В идеальном случае, когда в результате контакта двух одинаковых твердых тел происходит их полное сцепление и граница между телами исчезает, уменьшение свободной энергии равно сумме энергий приведенных в соприкосновение поверхностей:  $E_{п1} + E_{п2}$  – В реальном случае граница всегда существует и может быть охарактеризована граничной энергией  $E_{гр}$ . Выигрыш в свободной энергии  $\Delta E$  при адгезии в этом случае следующий:

$$\Delta E = E_{п1} + E_{п2} - E_{гр}. \quad (1)$$

Чем больше  $\Delta E$ , тем при прочих одинаковых условиях вероятнее адгезия. О влиянии  $\Delta E$  на интенсивность адгезионного взаимодействия свидетельствует большой экспериментальный материал [5].

Поскольку поверхностная энергия твердого тела находится в прямой зависимости от энергии межатомных связей (когезионной прочности), можно было бы ожидать, что адгезия должна увеличиваться при переходе от веществ со слабыми межатомными связями к веществам с более сильными межатомными связями. Вместе с тем сообщается, что при трении одноименных металлов в вакууме коэффициент трения уменьшается в ряду Ti, Zr, Ta, Fe, Cr, Mo, Pt, Pd, Re, Rh, Ru; при трении в паре с SiC коэффициент трения

уменьшается в ряду: Ti, Zr, Fe, Ni, Co, W, Re, Ru [6]. Можно убедиться, что порядок в указанных рядах соответствует увеличению вклада  $d$ -орбиталей в металлическую связь, что равносильно повышению поверхностной энергии. Противоречие можно усмотреть также в том, что окислы на поверхности  $d$ -переходных металлов, также имеющие большую поверхностную энергию, значительно снижают адгезию. Таким же образом влияют на адгезию карбиды и нитриды  $d$ -переходных металлов IV-VI групп, которые составляют основу покрытий на режущих инструментах.

Указанные противоречия кроются, по-видимому, в том, что выигрыш в свободной энергии не является единственным фактором, определяющим интенсивность адгезионного взаимодействия.

Для реализации химической адгезии необходимо пространственное перекрытие валентных орбиталей атомов контактирующих поверхностей. Вероятность пространственного перекрытия валентных орбиталей ( $W_{по}$ ) должна увеличиваться при сближении контактирующих тел, которое возможно за счет увеличения сжимающего контртела нагрузки, а также за счет увеличения температуры контакта, обеспечивающей повышение энергии тепловых колебаний атомов (а значит и амплитуды этих колебаний), увеличения диаметра валентных орбиталей. Вероятность  $W_{по}$  может быть также увеличена за счет удаления и предотвращения образования на контактирующих поверхностях окисных пленок, за счет совместной пластической деформации, приводящей в соприкосновение поверхности контртел, а также за счет дополнительной активации поверхностей электронной бомбардировкой, электромагнитным излучением (рентген, -лучи, ультрафиолет) и другими воздействиями.

При анализе взаимодействия двух поверхностей целесообразно иметь в виду два предельных случая:

1) подводимой энергии оказывается достаточно для пространственного перекрытия орбиталей с  $W_{по} \sim 1$ . В этом случае работа адгезии определяется вероятностью обобществления электронов, которая будет увеличиваться с увеличением выигрыша в свободной энергии системы  $\Delta E$ ;

2) подводимой энергии недостаточно для пространственного перекрытия орбиталей ( $W_{по}$ ), в связи с чем, несмотря на большой энергетический выигрыш, который можно было бы получить в результате адгезии, работа адгезии будет невелика.

Высокая стабильность локализованных конфигураций и малый

статистический вес нелокализованных электронов в таких соединениях как TiN, TiC, а также в большинстве окислов, определяют малую вероятность перекрытия валентных орбиталей при трении, что и обуславливает сравнительно низкую адгезию этих соединений с контртелом и их эффективность при использовании в качестве покрытий на рабочих поверхностях узлов трения.

3) Анализ работ в области технологии износостойких покрытий для режущих инструментов показывает, что особое внимание уделяется покрытиям на основе нитридов и карбидов *d*-переходных металлов IV-VI групп периодической системы элементов (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W), характеризующихся высокими значениями температуры плавления, твердости, теплостойкости [7]. Этот комплекс важных характеристик соединений перечисленных металлов определяется особенностями их электронной структуры, в частности, высоким статистическим весом стабильных электронных конфигураций  $sp^3$  и  $s^2p^6$ , обуславливающих межатомные связи «металл-неметалл», и конфигураций  $d^5$ , обеспечивающих межатомные связи «металл - металл». Основным свойством износостойкого покрытия является его низкая адгезионная активность по отношению к основному материалу. С повышением температуры в связи с дестабилизацией и разрушением связей «металл - неметалл» адгезионная активность покрытий возрастает и покрытия на основе TiN и TiC мало эффективны.

При высоких температурах более эффективными оказываются покрытия HfC, HfN, ZrC, ZrC. Известно, что соединения на основе гафния и циркония имеют и более высокую, чем соединения титана, температуру плавления; это, в соответствии с теорией [4]. Различие между соединениями титана, с одной стороны, и циркония и гафния, с другой, состоит в том, что цирконий и тем более гафний имеют по сравнению с титаном более высокие значения главного квантового числа, от которого существенно зависит высокотемпературная стабильность  $d^5$ -конфигураций.

4) Результаты изучения работы адгезии жидких Al, Fe и Si к карбидам *d*-переходных металлов IV-VI групп показывают, что на адгезию существенно влияет также количество электронов на *d*-уровне изолированного металлического атома соединения [4]. По мнению авторов конфигурационной модели вещества, этот параметр во многом определяет как интенсивность межатомных связей в соединениях, так и кинетические их свойства. Очень важно, что

влияние количества электронов на 2-ом уровне изолированного металлического атома на весь спектр соединения имеет немонотонный характер. Это открывает широкие технологические возможности для создания покрытий, как с высокой, так и с низкой адгезионной активностью.

**Результаты.** Фазовый анализ полученных покрытий показывает, что все они состоят главным образом из твердого раствора Mo в нитриде титана.

По сравнению с нелегированным покрытием TiN, в легированных покрытиях малые, до 6% (мас.) и большие, > 21% (мас.) концентрации молибдена соответствуют большей адгезионной активности покрытий, а концентрации молибдена от 6 до 21% (мас.) — меньшей адгезионной активности покрытий.

Полученный результат свидетельствует о том, что за счет введения в покрытие TiN молибдена удастся регулировать высокотемпературную стабильность  $d^5$ -конфигураций (за счет большего квантового числа молибдена и за счет изменения средней концентрации электронов на ( $d$ -уровне металлического атома).

Возможность регулирования адгезионной активности материала путем целенаправленного его легирования позволяет «конструировать» многослойные покрытия, в которых ближайшие к подложке слои должны обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке, а внешние слои покрытия — низкую адгезию покрытия по отношению к обрабатываемому материалу.

### Список литературы

1. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко; під ред. професора Ю.Г. Сухенка. – К.: НУХТ, 2010. – 547 с.

2. Мацевитый В.М. Электронная структура карбидов, нитридов и оксидов d-переходных металлов IV –VI групп и их адгезионная активность / В.М. Мацевитый, И.Б. Казак, К.В. Вакуленко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006, № 1/2, с. 85-89.

3. Мацевитый В. М. Физико-технические аспекты адгезии твердых тел / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко . – Київ : Наукова думка, 2010 . – 253 с.

4. Самсонов Г. Б. Конфигурационная модель вещества. / Г. Б. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф.Прядко - Киев: Наук, думка, 1971. -

229 с.

5. Самсонов Г. В. Проблемы создания неорганических веществ и материалов с заданными свойствами / Конфигурационные представления электронного строения в физическом материаловедении. - Киев: Наук, думка, 1977. - С. 5-15.

6. Бекли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. - Москва: Машиностроение, 1986. - 360 с.

7. Погребняк А.Д. Защита от трения и износа с помощью многокомпонентных нанокompозитных покрытий на основе титана / А.Д. Погребняк, Ф.В. Пшик, В.М. Береснев, Б.Р. Жоллыбеков // Трение и износ. - 2014, Т.35, №1.- С.72-86.

### **Анотація**

#### **ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ АДГЕЗІОННОЇ АКТИВНОСТІ МАТЕРІАЛУ**

*Розглянуто деякі аспекти адгезійної взаємодії, які мають відношення до процесу тертя в вузлах механізмів і машин харчової та переробної промисловості. В рамках електронної теорії конденсованого стану проаналізована роль міжатомної взаємодії поверхневих атомів твердих тіл в процесі адгезії. Розглянуто вплив ряду покриттів на силу тертя контактуючих тіл. Показано, що адгезію і силу тертя значно зменшують покриття з карбідів і нітридів d-перехідних металів IV-VI груп.*

### **Annotation**

#### **INCREASING WEAR RESISTANCE OF FRICTION UNITS BY DECREASING ADHESIONAL ACTIVITY OF MATERIAL**

*Some aspects of the adhesive interaction that are related to the friction process in the nodes of the mechanisms and machines of the food and processing industry are considered. In the framework of the electronic theory of condensed matter, the role of interatomic interaction of surface atoms of solids in the adhesion process is analyzed. The effect of a number of coatings on the friction force of contacting bodies is considered. It was shown that adhesion and friction force are significantly reduced by coatings of carbides and nitrides of d-transition metals of groups IV-VI.*