

УДК 621.91.04; 621.82; 621.893

*А. В. Волков, В. А. Годлевский, В. В. Марков\**

**ОПИСАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛЕЗВИЙНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОЙ АДСОРБЦИИ**

**DESCRIPTION OF SURFACE-ACTIVE LUBRICANT MATERIALS ACTIVITY AT METAL EDGE CUTTING USING MONOMOLECULAR ADSORPTION MODEL**

Ивановский государственный университет

\*Ивановский государственный энергетический университет

*Использована лэнгмюровская модель мономолекулярной адсорбции из растворов на твердой поверхности для описания экспериментальной зависимости работы резания от концентрации поверхностно-активной присадки. Модель подвергли проверке с использованием модельных СОТС – водных растворов гликолей. Выявлено хорошее соответствие модельного описания и экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** обработка резанием, СОТС, граничная смазка, адсорбция.

*The Langmuire's model of monomolecular adsorption from solutions on solid surface for description of experimental dependence cutting work vs. surfactants' concentration was used. The model was tested with help of model lubricants – water solutions of glycols. Good accordance of model description and experimental data was established.*

**Key words:** machining, cutting fluids, boundary lubrication, adsorption.

**Введение**

Основное трибологическое действие смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в процессах обработки материалов резанием по определению заключается в уменьшении силы трения на контактных площадках между инструментом и обрабатываемым материалом, что проявляется в уменьшении силы резания. Опыт показывает, что эффективные смазочные материалы могут снижать полную силу трения на величину до 30 %. Однако обычно вариация силы резания для различных типов водных СОТС с присадками поверхностно-активных веществ (ПАВ) не превышает 10 %. По этой причине при выборе типа поверхностно-активных присадок и оптимизации их состава требуется хорошая воспроизводимость силоизмерительных опытов. Наши эксперименты показали, что существенно снизить статистический разброс данных можно путем подключения к силоизмерительной установке интегратора. Это позволяет измерить работу резания, затрачиваемую на срезание слоя фиксированного объема материала. В качестве интегрирующего устройства может использоваться либо специальный аналоговый прибор-интегратор, либо цифровая компьютерная интегрирующая программа.

Для изучения смазочной активности трибоактивных присадок к СОТС информативной экспериментальной характеристикой, отражающей эффективность присадки,

является зависимость работы резания от концентрации  $A(c)$  при фиксированном режиме обработки. Получение с использованием упомянутого выше интегрирующего устройства такого рода кривых для обширного ряда присадок показало, что графики этой зависимости имеют следующий характер: относительно быстрый линейный спад и затем стабилизация на примерно постоянном уровне (см. рисунок). Обращает на себя внимание тот факт, что подобная форма кривой аналогична виду изотерм поверхностного натяжения  $\sigma(c)$  водных растворов ПАВ.

Этот факт дал возможность применить теорию мономолекулярной адсорбции И. Ленгмюра для интерпретации полученных силовых концентрационных зависимостей процесса резания. Рассмотрим эту проблему в рамках капиллярной модели смазочного действия СОТС, которая описывает смазочный процесс как адсорбцию трибоактивных молекул на внутренних стенках микроскопической капиллярной сети, существующей в зоне неплотного контакта инструмента с обрабатываемым материалом [1].

Предположим, что с ростом концентрации ПАВ в составе СОТС увеличивается поверхностная концентрация адсорбированных молекул на внутренних стенках капилляра, что приводит к образованию граничного смазочного слоя и, следовательно, к снижению сопротивления сдвига. Такой процесс локализован главным образом на передней поверхности инструмента, где имеет место более протяженный контакт материалов, чем на задней поверхности.

### Теория

Согласно «классической» модели адсорбции Ленгмюра, процесс этот протекает в пределах монослоя (мономолекулярная адсорбция) [2]. Адсорбция на поверхностных активных центрах достигает при определенной концентрации предельного значения, что в нашем случае должно приводить к эффекту стабилизации силы (работы) резания, начиная с определенной концентрации присадки.

Пусть  $n$  – поверхностная концентрация адсорбированных молекул на площадках контакта, а  $n_0$  – поверхностная концентрация свободных активных центров. По аналогии с лэнгмюровской моделью можно использовать следующую гипотезу:

$$n = \beta n_0 c, \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация присадки в базовой среде;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности, определяющий адсорбционную активность молекул ПАВ на поверхности с данными физико-химическими свойствами.

Положим для простоты, что коэффициент  $\beta$  одинаков для поверхности инструмента и прирезцовой поверхности стружки). Учитывая, что каждый активный центр может быть занят только одной молекулой, можно записать:

$$n + n_0 = n_{\max}, \quad (2)$$

где  $n_{\max}$  – максимальная концентрация адсорбата при заполнении им всех активных центров (предельная адсорбция). Тогда

$$n = \frac{\beta c n_{\max}}{1 + \beta c}. \quad (3)$$

Разумно предположить, что значение коэффициента трения зависит от концентрации адсорбированных молекул, т. е.  $k - k_0 = f(n)$ , где  $k_0$  – коэффициент трения

при использовании чистого растворителя. Разлагая эту функцию в ряд Тейлора и ограничиваясь только линейным слагаемым, получим

$$k - k_0 = -\xi n, \quad (4)$$

где  $\xi$  – константа, отражающая смазочную активность адсорбированных молекул ПАВ. (Знак минус введен в силу того, что  $k_0 > k$ .) Отсюда

$$k - k_0 = -\frac{\xi \beta c n_{\max}}{1 + \beta c}. \quad (5)$$

Здесь мы используем полученную ранее зависимость, описывающую величину работы, производимой силой сдвига вдоль передней поверхности в зависимости от условий вторичной деформации стружки [3]

$$A = C_1 - \frac{C_2}{e^{\frac{k}{H}(l-l_0)} - 1}, \quad (6)$$

где  $H$  – толщина стружки;  $l$  – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента;  $l_0$  – длина зоны вторичной деформации по передней поверхности;  $h$  – толщина зоны вторичной деформации;  $C_1$  и  $C_2$  – константы.

Используя формулу (6), найдем окончательное выражение для  $A$ , используя относительную работу резания, т. е.  $A/A_0$ , где  $A_0$  – работа резания при использовании чистого растворителя. Тогда

$$\frac{A}{A_0} = \frac{C_1 - C_2 e^{\frac{k}{H}(l-l_0)}}{C_1 - C_2 e^{\frac{k_0}{H}(l-l_0)}} = 1 + \frac{C_2(l-l_0)}{H} \cdot \frac{k - k_0}{C_1 e^{\frac{k_0}{H}(l-l_0)} - C_2}. \quad (7)$$

Подставляя в эту выражение формулу (5), получим

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \frac{\alpha c}{1 + \beta c}, \quad (8)$$

где

$$\alpha = \frac{\xi \beta n_{\max}(l-l_0)}{H} \cdot \left[ \frac{C_1}{C_2} e^{\frac{k_0}{H}(l-l_0)} - 1 \right]^{-1}. \quad (9)$$

Все коэффициенты в уравнении (9) имеют простой физический смысл:

- для малых концентраций уравнение (9) приобретает простой вид линейной зависимости  $A/A_0 = 1 - \alpha c$ , т. е. в области низких концентраций коэффициент  $\alpha$  представляет собой скорость изменения работы резания от концентрации;
- в случае больших концентраций уравнение (9) вырождается в постоянную функцию  $A/A_0 = 1 - \alpha/\beta$ , т. е. по существу величина  $\alpha/\beta = \Delta A$  характеризует максимально возможное уменьшение работы резания для испытываемой присадки.

### Эксперимент

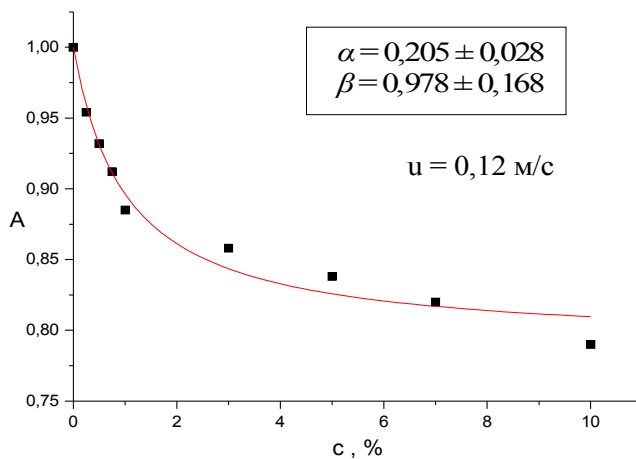
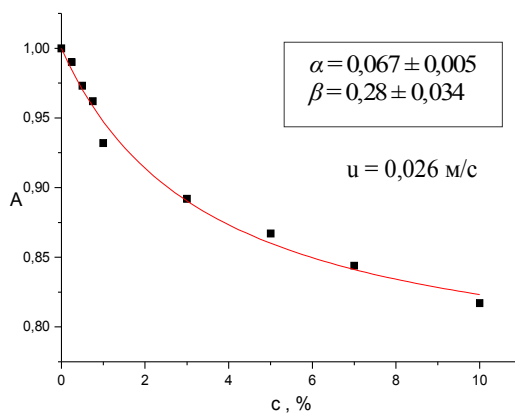
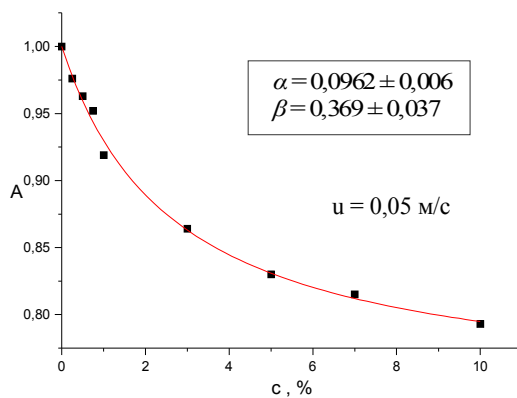
Для проверки полученных теоретических выкладок был произведен следующий эксперимент. Измеряли работу резания при сверлении отверстий сверлом Ø 4.2 из стали Р6М5 в заготовке из стали ст. 3. Подача составляла 0,08 мм/об, резание производили при трех значениях скорости резания: 0,025; 0,050 и 0,120 м/с.

В качестве модельных СОТС были выбраны водные растворы гликолей: этиленгликоля  $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ , диэтиленгликоля  $(\text{CH}_2\text{OHCH}_2)_2\text{O}$  и триэтиленгликоля  $(\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$ , которые имеют гидроксильные полярные группы, обеспечивающие их адсорбцию при формировании граничного смазочного слоя. Выбор трех веществ из ряда данных химических продуктов был обусловлен возможностью сопоставления их трибологической активности в связи с различиями в структуре молекулы. Работа резания определялась в относительных единицах как отношение показаний интегратора, полученных при сверлении с растворами гликолей к данным интегратора по сверлению с дистиллированной водой.

Данные эксперимента представлены в виде графиков. Для аппроксимации графиков по экспериментальным точкам использовалась полученная нами выше модель (8). Примеры графиков вида  $A/A_0 = f(c)$  показаны на рисунке, а оценки коэффициентов регрессии, характеризующие согласие модели с экспериментальными данными приведены в таблице.

#### Значения коэффициентов регрессии зависимости относительной работы резания $A/A_0$ при сверлении от концентрации $c$ присадки этиленгликоля

Присадка ПАВ	Скорость резания, м/с	Коэффициенты регрессии	
		$\alpha$	$\beta$
Этиленгликоль	0,026	0,067±0,005	0,280±0,034
	0,050	0,096±0,006	0,369±0,037
	0,120	0,205±0,028	0,978±0,168
Диэтиленгликоль	0,026	0,069±0,005	0,422±0,041
	0,050	0,179±0,015	0,779±0,085
	0,120	0,164±0,019	0,588±0,096
Триэтиленгликоль	0,026	0,153±0,020	0,915±0,154
	0,050	0,334±0,042	1,996±0,299
	0,120	0,265±0,045	1,284±0,269



Зависимость работы резания  $A$ , отн. ед., затраченной на обработку отверстия в стальном образце от концентрации  $C$ , масс. %, водного раствора этиленгликоля при различных скоростях резания  $u$ :  
 $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты регрессии в уравнении (8)

### Выводы

Анализ графиков зависимостей работы резания от концентрации гликолей позволяет сделать следующие выводы.

1. Результаты статистической обработки опытных точек показывают, что используемая для аппроксимации лэнгмюровская модель (8) адекватно описывает экспериментальные данные.
2. Для оценки эффективности смазочного действия трибоактивных присадок можно использовать параметры  $\alpha$  и  $\beta$ , входящие в формулу (8). Причем, параметр  $\alpha$  характеризует скорость изменения работы резания при низких концентрациях ПАВ, а  $\beta$  определяет максимально возможное уменьшение работы резания при заданных условиях процесса, причем в качестве показателя эффективности присадки может быть использована оценка снижения работы резания, вызванного данной присадкой

$$\Delta A = \frac{A_0 \alpha}{\beta}. \quad (10)$$

3. Поскольку при применении ПАВ концентрация их в рабочей среде не превышает нескольких процентов, использование параметра  $\alpha$  для оценки эффективности действия смазочной среды представляется более убедительным.
4. В области низких концентраций лучшим смазочным эффектом обладает смазочная среда на основе триэтиленгликоля – величина  $\alpha$  у него в два раза больше, чем у других гликолей, что свидетельствует о более высокой адсорбционной активности молекул триэтиленгликоля по сравнению с другими веществами из испытанного ряда.
5. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению различия в смазочном действии гликолей, что соответствует известному экспериментальному факту о том, что при увеличении скорости резания различия в эффективности разных СОТС нивелируются. В целом результаты проведенного исследования показывают, что смазочная активность, понимаемая как традиционная адсорбционная активность ПАВ, играет определяющую роль в процессе резания, по крайней мере при относительно малой скорости и температуре резания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 2.1.2/4670.*

### Список литературы

1. Годлевский В. А., Волков А. В., Латышев В. Н., Маурин Л. Н. // Трение и износ. 1996. Т. 17. № 3. С. 345 – 351.
2. Адамсон А. Физическая химия поверхностей : пер. с англ. И. Г. Абидора / под ред. З. М. Зорина, В. М. Муллера. М. : Мир, 1979.

*Поступила в редакцию 10.06.2009 г.*