

Адгезионный износ.

И.Х. Кусеев, Д.Н. Березин, В.В. Митрафанов  
*Магнитогорский государственный технический университет  
им.Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.*

**Аннотация.** В данной статье изложен общий обзор адгезионного износа, имеющего большое значение для ряда технических устройств с трением покоя и скольжения. Адгезионный износ является одним из самых распространенных и неизбежных видов износа, поэтому его механизм усиленно исследуется в течение длительного времени. Тема адгезионного износа является далеко не новой в машиностроении, металлургии и схожих дисциплинах. Этимологической основой понятия является термин «adhaesio» (адгезия), переводимый с латинского языка как «сцепление, притяжение, прилипание» поверхностей разнородных тел. В настоящей статье будут резюмированы основные наиболее общие положения, связанные с адгезией и адгезионным износом, а также процесс адгезионного износа при резании металлов.

**Ключевые слова:** адгезия, адгезионный износ, когезия, когезионный, фрикционно-адгезионное взаимодействие, изнашивание, трение.

Под адгезионным взаимодействием подразумевают все виды межатомного и межмолекулярного взаимодействия между твердыми телами при их контактировании и относительном скольжении, а под изнашиванием - отделение частиц материала в приконтактной зоне в результате многократного нарушения фрикционных связей. Поэтому адгезионный вид износа считают весьма распространенным видом износа, механизм которого при поверхностях различных материалов исследуется уже на протяжении нескольких десятков лет. Этот процесс изнашивания обусловлен действием больших локальных давлений, сваривания между собой материалов шероховатых поверхностей, последующей пластической деформации, возникающей при их относительном перемещении, отделение частиц локальных сцеплений вершин шероховатостей, удаления или переноса материала. [1]

Основой адгезии является Ван-дер-Ваальсовое, полярное межмолекулярное взаимодействие, иногда — образование химических связей или взаимная диффузия в поверхностном слое, и характеризуется необходимой для разделения поверхностей удельной работой. В ряде ситуаций сцепление поверхностей разнородных тел оказывается даже выше, чем у однородных материалов (когезия). Тогда следствием взаимодействия становится когезионный разрыв на участке сцепления, т.е. разрыв более слабого по прочности материала.

Адгезия оказывает значительное влияние непосредственно на процесс трения. Так, можно наблюдать следующую ситуацию, что чем выше адгезия поверхностей, тем больше сила трения, и наоборот. Яркой иллюстрацией этого

можно считать открытым случайно в 1938-м году тефлон (ПТФЭ, фторопласт-4  $(-C_2F_4)_n$ ), который при незначительной адгезии с большей частью соприкасающихся тел характеризуется и низким коэффициентом трения. У такого вещества как графит наблюдается одновременно низкая адгезия и когезия, поэтому его используют в качестве твердой смазки.

Среди наиболее популярных теорий адгезии выделяют такие как: адсорбционная, механическая, электрическая, электронная, диффузионная, химическая.

В таблице представлен порядок постоянных величин адгезионного износа при различных условиях смазки.[2].

Таблица 1

Порядок постоянных величин адгезионного износа  $k$  при различных условиях смазки

Условия смазки	Металл и металл		Неметалл и металл
	одинаковые	разные	
Смазки нет	$5 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-4}$	$5 * 10^{-6}$
Плохая смазка	$5 * 10^{-4}$	$2 * 10^{-5}$	$5 * 10^{-6}$
Обычная смазка	$5 * 10^{-5}$	$2 * 10^{-6}$	$5 * 10^{-6}$
Качественная смазка	$5 * 10^{-6} - 10^{-7}$	$2 * 10^{-6} - 10^{-7}$	$2 * 10^{-6}$

При адгезионном износе средняя глубина износа может быть оценена по формуле:

$d_{adh} = k_{adh} p_m L_s$ при $p_m < \sigma_{yp}$	(2)
-----------------------------------------------------	-----

(неустойчивый процесс заедания и схватывания при  $p_m \geq \sigma_{yp}$ )

Трудность практического применения этого выражения обусловлена необходимостью определения соответствующей величины постоянной адгезионного износа  $k_{adh}$ . Для различных сочетаний материалов величины  $k_{adh}$  находятся в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^{-13}$  дюйм<sup>2</sup>/фунт. Хотя некоторые данные (часть из них приведена в таблице), позволяющие в ряде случаев приблизительно определить значения, уже опубликованы.

Адгезионный износ является результатом действия сил адгезии, т.е. сил межмолекулярного взаимодействия ювенильных (химически чистых, очищенных от окислов) свежесформированных поверхностей стружки и заготовки при их контакте с поверхностями инструмента в процессе совместного трения.

Рассмотрим контакт двух трущихся поверхностей, сжимаемых силой  $P$  (рис. 1).

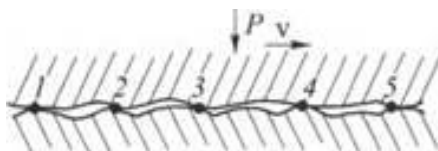


Рисунок 1 – Контакт двух поверхностей при адгезионном износе

В точках 1...5 их фактического соприкосновения возникают связи - «мостики», которые при скольжении одной поверхности относительно другой разрываются. Вслед за ними возникают новые связи, которые затем также разрываются и т.д. При этом разрушение происходит, прежде всего, по менее прочному обрабатываемому материалу. Однако время от времени разрушается и инструментальный материал. Причем, если это быстрорежущая сталь, то разрушение происходит в результате появления при высокой температуре в тончайших контактных слоях стали усталостных микротрещин. Адгезионному износу быстрорежущих сталей также способствует динамическая рекристаллизация, снижающая их прочность.

У твердых сплавов отделение частиц износа обычно происходит по границам зерен карбидов, по менее прочной кобальтовой связке, объем которой с ростом температуры резания за счет выгорания уменьшается. Характерным признаком адгезионного износа является ячеистый (в виде мелких ямок) вид изношенной поверхности инструмента (рис. 2).

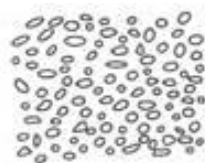


Рисунок 2 – Поверхность режущего инструмента при адгезионном износе

С повышением температуры резания прочность адгезионных связей ослабляется, размеры отдельных частиц износа уменьшаются и поверхность износа становится более ровной.

Явление адгезионного износа характерно при таком процессе, как резание (прежде всего резание металлов). Так, одним из основных источников теплоты и факторов деформирования поверхностей при резании является трение. И так как оно происходит при высокой температуре в условиях ювенильности контакта и наличия практических деформаций, то преобладает в нем именно адгезионная (молекулярная) составляющая. [7]. То есть в процессе резания создаются все предпосылки к тому, что адгезионные явления играли наиболее значимую решающую роль. Это частично подтверждают следующие данные:

- характерные вырывы на изношенных поверхностях инструментов;
- обнаруженные с помощью радиоактивных изотопов частицы инструментального материала, расположенные дискретно на обработанной поверхности;
- результаты рентгеноспектрального анализа контактировавших при резании поверхности инструмента и обработанной детали;
- зависимость свойств обработанной поверхности от технологической среды и др.

В ряде исследований приведены прямые доказательства действия адгезии как одного из наиболее значимых факторов при резании металлов, представлены данные о закономерностях фрикционно-адгезионного

взаимодействия твердых металлических тел с учетом температурных и механических факторов, о количественных связях износа инструмента и параметров состояния поверхности обрабатываемой заготовки [7].

Особым интересом пользовалась тема трения и адгезионного взаимодействия при высоких температурах, сложность исследования которой заключается в проведении испытания в вакууме или в атмосфере инертных газов, что создает дополнительные трудности в связи с созданием испытательной аппаратуры и ее эксплуатацией [8]. При этом, как правило, применяют косвенный метод нагрева образцов, хотя можно использовать и электроконтактный нагрев за счет пропускания через контакт высокого электрического тока. Схема испытаний обычно предусматривает трение трубчатых или цилиндрических образцов торцами, плоскими или полусферическими, а также возвратно-поступательное движение плоских образцов или полусферического ползуна по плоской поверхности вращающегося диска. Данные методы большей частью необходимы для определения нормальной адгезии (расходуемых на отрыв сил у контактирующих материалов), определяемой после снятия нагрузки. Что вызывает значительные погрешности, возникающие вследствие частичного упругого восстановления контактирования микронеровностей и разрыва образовавшихся под нагрузкой адгезионных связей. При этом определяется прочность соединений на разрыв, в то время как при трении происходит в основном срез соединений под нагрузкой [5].

В работе «Технология машиностроения» К.С.Колева [3] описаны исследования при трении трубчатых образцов из обрабатываемых материалов с образцами из твердых сплавов (при различных температурах и нормальных нагрузках). При этом определялась прочность адгезионных связей на срез и на отрыв при отсутствии нормальных напряжений, что (как уже отмечалось в данной статье) ведет к серьезным погрешностям и не отвечает реальным условиям скольжения при резании металлов. Поэтому согласно модели, впервые описанной В.В.Крагельским и Н.М.Михиным [4] была создана специальная аппаратура, позволяющая проводить электроконтактный нагрев и обеспечить при этом характерное изменение температуры по глубине контактирующих тел.

К настоящему времени окончательно сформирована адгезионная теория схватывания, которая благодаря работам А.П. Семёнова, С.Б. Айнбиндера, Н.А. Буше, И.В. Крагельского и других стала общепризнанной. Основные положения адгезионной теории схватывания сводятся к следующему [6].

1. Большинство металлов образуют прочные соединения при соприкосновении чистых (ювенильных) поверхностей. При схватывании происходит выделение энергии. В реальных условиях схватыванию препятствуют поверхностные пленки.

2. Ювенильные поверхности образуются в результате сдвига соприкасающихся неровностей в местах действительного контакта, площадь которых может составлять лишь доли процента от номинальной площади. При этом возникают мостики холодной сварки (адгезионные мостики).

3. В ряде условий (наклеп, стеснение пластических деформаций, наличие твердых интерметаллидов и др.) сдвиг происходит не по границе раздела, а по менее прочному материалу и сопровождается переносом материала.

4. Существует критическая пластическая деформация, при которой создается критическая плотность адгезионных мостиков, что приводит к множественному схватыванию, образованию адгезионного шва.

5. Порог схватывания определяется как свойствами материалов, так и свойствами поверхностных пленок.

Приведенным положениям соответствуют результаты исследований адгезионного изнашивания трущихся сопряжений, приведенные во многих публикациях по трибологии, основные выводы из которых могут быть сформулированы в терминах относительной прочности адгезионного соединения, формируемого в процессе скольжения [2]:

- если соединение более слабое, чем прочность какого-либо из металлов, тогда оно срезается по границе раздела между металлами,
- если соединение более слабое, чем прочность одного из металлов, но прочнее другого, тогда срез происходит по более мягкому металлу и продукты изнашивания остаются на поверхности твердого металла,
- если соединение прочнее каждого из металлов, то срезаются оба металла и повреждаются обе поверхности.

С учетом первостепенной роли пластической деформации в адгезионной теории схватывания заслуживает внимания концепция английской трибологической школы, в соответствии с которой начало схватывания определяется экспериментальной зависимостью, положенной в основу модели схватывания [1]:

$q^2 + a\tau^2 = k^2$	(3)
-----------------------	-----

где  $q$  - нормальное давление на микронеровностях,  $\tau$  - касательное напряжение,  $a$  - постоянный коэффициент,  $k$  - константа текучести (предел прочности на сдвиг) менее прочного из материалов.

Несмотря на простоту, отсутствие учета деформационного упрочнения и особенностей развития повреждения эта зависимость имеет фундаментальное значение, так как связывает важнейшие факторы напряженного состояния поверхностного слоя при трении (нормальное и касательное напряжения) с пределом прочности материала при сдвиге аналогично критерию текучести Мизеса. Следовательно, создание условий, предупреждающих пластическое течение материала, лежит в основе предотвращения схватывания и образования адгезионной связи с последующим его разрушением.

В соответствии с современной (и самой поздней) интерпретацией адгезионного изнашивания [6] разрыв образовавшейся связи происходит по плоскостям максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  (линиям скольжения), проходящим по телу микровыступов. Линии скольжения не совпадают с адгезионным швом. При сдвиге зона пластически деформированных материа-

лов сопряженных поверхностей несколько затормаживается и локализуется в линзообразной области. При продолжении сдвига в образовавшемся адгезионном соединении разноименных материалов происходит смещение линий скольжения к адгезионному шву. Поэтому, если один или оба материала вблизи адгезионного шва не испытывают всестороннего сжатия и имеют возможность перемещаться, заторможенная область стягивается в компактный узел, ограниченный линиями максимальных касательных напряжений, и приобретает вращательное движение. При этом возникший конгломеративный микрообъем утрачивает связь с основными материалами и превращается в частицу износа.

Отмечается, что адгезионный шов образуется только при отсутствии смазочных пленок и окислов. При их наличии пластическое течение локализуется в тонком поверхностном слое без схватывания. Кроме того, образование прочной адгезионной связи происходит при определенной нагрузке и температуре, обеспечивающих разрушение разделительных пленок.

В развитие адгезионной теории схватывания вводится [6] понятие адгезионной совместимости для жестко пластического тела, оцениваемой величиной  $\eta_\tau$ :

$\eta_\tau = \frac{\tau_k}{k} \leq 1,$	(4)
----------------------------------------	-----

где  $\tau_k$  - напряжение среза для адгезионного соединения,  $k$  - константа текучести менее прочного из сопряженных материалов

При этом под полной адгезионной совместимостью ( $\eta_\tau = 1$ ) понимается схватывание поверхностей, для наступления которого необходимо преодолеть некоторый энергетический барьер. И для этого поверхности должны иметь достаточную энергию активации, поставляемую путем нагружения и/или нагрева. Характерно, что и в этой теоретической модели используются базовые положения и подходы из теории пластичности.

Анализ и сравнение подходов технологической школы [5] и ученых-трибологов в оценке и описании явлений адгезионного изнашивания позволяет сделать два важных вывода:

1) к настоящему времени верхний нагрузочный порог адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей пересмотрен в сторону снижения и им является константа текучести - предел прочности при сдвиге  $k$ ;

2) для описания механизма возникновения и развития адгезионной связи используются критерии и модели поведения материалов, применяемые в теории пластичности;

Это указывает на исключительную важность пластической деформации как ведущего фактора в механизме возникновения и реализации адгезионного изнашивания.

Таким образом, под адгезионным износом понимается износ под действием сил адгезии (межмолекулярного межатомного взаимодействия) в результате непрерывных процессов сцепления поверхностных слоев

материалов с последующим процессом разрушения образовавшейся сцепки (склеивания). Такой процесс наиболее характерен для резки металлов, когда из-за разницы в прочности и твердости материалов заготовки и инструмента происходит разрушение заготовки на поверхностных участках обрабатываемой детали, маленькие частички которой налипают на инструмент. Обратная ситуация повреждения самого инструмента наблюдается очень редко и проявляется через глубинное вырывание частиц, с образованием специфических кратеров.

Действия адгезии как одного из наиболее значимых факторов при резании металлов, обусловлено закономерностями фрикционно-адгезионного взаимодействия твердых металлических тел с учетом температурных и механических факторов и количественными связями износа инструмента и параметров состояния поверхности обрабатываемой заготовки.

#### **Библиографический список**

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение 1984.
2. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел. Ч. 2. / Ф.П. Боуден, Д.М. Тейбор. - М.: Машиностроение, 1968. - 544 с.
3. Колев К.С. Технология машиностроения. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1977. – 254 с.
4. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: справочник / И. В. Крагельский, 1984. – 280 с.
5. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
6. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.
7. Шустер Л. Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. - 96 с.