

Мурзакулов К.Е., Макаров В.П.

ИЗНОС ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА БЕЗ СМАЗКИ

K.E. Murzakulov, V.P. Makarov

WEAR OF ELECTROLYTIC IRON WITHOUT LUBRICATION

УДК: 629.113.004.67

В статье приводятся результаты исследования на износ электролитического железа о сталь, чугун и бронзу без смазки. Приводится объяснение процессов при трении электролитического железа с указанными материалами.

The summary in the outcomes of a research on wearing of electrolytic iron about steel, pig iron and bronze without lubrication are resulted. The explanation of processes for want of friction of electrolytic iron with the indicated materials is resulted.

Применение электролитического железного покрытия как способа восстановления деталей машин натиранием может быть использовано для самых различных узлов трения. В целях выявления влияния материала контртела покрытия электролитического железа испытывались на «пальчиковой» машине [1]. В качестве контртела принимались диски из стали 45, чугуна СЧ18 и бронзы Бр.ОЦС 4-4-2,5. Давление на образец принято $P=1\text{Мпа}$, а скорость скольжения изменялась от 0,5 до 6,5 м/с. результаты экспериментов показаны в таблице №1.

Таблица №1

Материал контртела	Скорость скольжения м/с				
	0,5	1,05	2,26	3,75	6,5
	Интенсивность износа мг/см ² на 10 ³ м. пути трения				
Сталь 45	2,56	3,25	0,24	0,48	2,98
Чугун СЧ 18	1,42	3,05	0,077	0,0046	0,0020
Бр. ОЦС 44-2,5	0,0001	0,0037	0,00053	Нарост	0,003

Из таблицы видно, что износ электролитического железа (в дальнейшем ЭЖ) по стали 45, на малых скоростях увеличивается. В диапазоне от 2 до 4 м/с наблюдается минимизация изнашивания ЭЖ, хотя и возникает очень медленное увеличение износа. Около 4 м/с начинается увеличение износа и при 6,5 м/с ЭЖ изнашивается в 10 раз сильнее, чем в зоне минимизации.

В процессе испытания при скорости 1 м/с образец изнашивался с четко выраженными рывками, которые

свидетельствовали о наличии процессов схватывания. Аналогично изнашивались образцы на скоростях 6,5 м/с. Изменение величины износа покрытия ЭЖ при трении по чугуну СЧ-18 в диапазоне скоростей от 1 до 6 м/с имеет только один экстремум при скоростях, близких к 1 м/с дальнейшее увеличение скорости резко снижает износ, который при 6 м/с имеет минимальное значение. На скоростях, больших 2 м/с, процесс трения происходит достаточно плавно, без рывков и схватывания. Измерение приведенного износа ЭЖ при трении по бронзе БР. ОЦС 4-4-2,5 без смазки, как и в предыдущих опытах, дает минимизацию износа. При скоростях трения 3,7...4 м/с износ составляет тысячные доли миллиграмма на 1000 метров пути трения. Процесс происходит ровно, колебаний усилия не наблюдается. На скоростях наименьшего износа периодически наблюдается перенос бронзы с контртела на образец. В этом случае при измерении величины износа образца происходило увеличение его размера. Однако при продолжении испытания наращенный слой бронзы исчезал, но в дальнейшем вновь появлялся. Наибольший износ наблюдается при наименьшей и наибольшей скоростях, т.е. при 0,5 и 6,5 м/с. Испытание покрытий ЭЖ на износ в контакте с различными материалами показывает, что во всех случаях обнаруживается зона минимального износа. Износ ЭЖ в этой зоне при трении по стали составляет 0,24 г/см² на 10³м пути трения, по чугуну 0,0046 г/см² на 10³м пути трения, а по бронзе 0,00053 г/см² на 10³м пути трения. Из рассмотрения зависимостей износа следует вывод, что ЭЖ имеет наибольший износ при трении со сталью, при трении с чугуном ЭЖ на скоростях около 1 м/с покрытие изнашивается интенсивно, но резко уменьшается при 2 м/с. Трение ЭЖ с бронзой сопровождается минимальным износом во всем диапазоне скоростей, принятых для испытания.

Анализ результатов исследования

Рассмотрение итогов проведенных экспериментов позволяет сделать выводы о том, что скорость скольжения при трении ЭЖ с различными материалами значительно влияет на процесс и темп его изнашивания. Являясь фактором внешнего воздейст-

вия на процесс трения, скорость скольжения характеризует энергию диссипации, расходуемую на превращение в материалах и изнашивание.

В зависимости от скорости скольжения в контактируемых объемах покрытия ЭЖ происходит развитие пластической деформации. В [2] указывается, что скорость скольжения сильно влияет на протекание различных физических и механохимических процессов, которые имеют место в контакте материалов и обуславливают интенсивность и характер износа. Пластическое деформирование металла приводит к увеличению плотности дислокаций и концентраций вакансий на его поверхности. Такое состояние материала на поверхности трения способствует протеканию процессов, в результате которых образуются новые структуры, отличные от исходного материала.

ЭЖ, которое применяется для восстановления изношенных автотракторных деталей, отличаются от обычных сталей по структуре и свойствам. Причиной этого считается процесс кристаллизации ЭЖ в электролите. Ион железа, который восстанавливается на катоде, приближается к нему с возрастающей скоростью. В момент осаждения ион теряет скорость, т.е. он как бы «выстреливает» в кристаллическую решетку и таким образом деформирует ее [3]. При таком осаждении происходит образование кристаллов с искаженными параметрами. Кроме этого, на катоде осаждается водород и гидроокись железа, которые также искажают решетку осадка-покрытия. Прямым следствием этих процессов при наращивании электролитического железа является наличие внутренних напряжений в покрытии. Эти напряжения выражаются в повышенной твердости осадка, его трещиноватости. Анализируя результаты экспериментов, необходимо учитывать перечисленные особенности процесса кристаллизации ЭЖ.

Анализ износа (табл. №1) и изучение поверхностей трения позволяют объяснить явления, которые происходят в контактируемых слоях ЭЖ. Изменение величины износа покрытия о сталь 45 имеет три явно выраженных участка. Первый участок имеет экстремум при 1 м/с и температуре около 100⁰С. Поверхность трения подвергается интенсивному схватыванию, которое на поверхности оставляет характерные язвы и вырывы. Подобное поверхностное разрушение называется схватыванием первого рода. Причиной этого разрушения следует считать образование локальных металлических связей между элементами поверхностей трения и последующих их разрывов. Диапазону 2.4 м/с соответствует участок с минимальным износом, на поверхности трения ЭЖ образуются пленки вторичных структур, которые резко уменьшают процесс схватывания. Роль вторичных структур (ВС) заключается в экранировании ювенильных поверхностей, тем самым в сдерживании процессов схватывания. Увеличение скорости скольжения

более 4 м/с резко интенсифицирует износ. Одновременно температура в зоне контакта поднимается до 240⁰С. Иными словами, третий участок соответствует тепловому изнашиванию - схватыванию второго рода. Высокая температура в зоне контакта способствует развитию «термической» пластичности покрытия, образованию мостиков схватывания и последующего их разрушения. Износ при тепловом изнашивании резко увеличивается. ВС образуются и при тепловом изнашивании, однако при высоких температурах они не экранируют ювенильные поверхности и не препятствуют образованию мостиков схватывания. Наибольший интерес представляет зона минимального износа. В режиме от 2 до 4 м/с поверхность трения ЭЖ приобретает особые структуры, которые обладают свойствами, способствующими уменьшению износа [2]. Эти свойства создаются новыми структурами, отличными от исходной, и являются продуктом реакции поверхности трения с окружающей средой. Эти структуры называют «вторичными» [4] или «третьим телом» [5]. ВС имеют четко выраженную границу с исходным материалом и обладают большей дисперсностью. Твердость ВС достигает 6,35 МПа, толщина этой структуры колеблется в различных образцах от 5 до 10 мкм. Согласно [2] образовавшиеся ВС представляют собой химическое соединение. На основании металлографического анализа, и используя [2], можно сделать вывод о том, что на поверхности трения ЭЖ образовавшиеся ВС представляют собой оксиды железа. На образование новых структур на поверхности трения многие исследователи обращали внимание. Так, новые структуры обнаруживались при волочении проволоки, при трении, при шлифовании деталей, при токарной обработке сталей и т.д.

В большинстве случаев, сталкиваясь с новой структурой в сечении в виде белой полоски, называют ее «белой фазой» при трении. Природа «белой фазы» объясняется диффузией в поверхностные слои деформированного металла углерода, кислорода и азота, только кислорода [6] или термическим воздействием в специфических условиях трения. Отмечалось, что «белая фаза» плохо травится. Из результата химического анализа следовало, что на поверхности трения в большом количестве присутствует закись железа (FeO), но также обнаруживаются следы трехвалентного железа. Из [3] следует, что в ЭЖ на каждые 200 г. осажденного железа приходится 228 см³ водорода. В отдельных случаях на один объем металла до 2000 объемов водорода.

В работе [7] указывается, что в процессе трения с повышением температуры выше 300⁰ С содержание водорода в осадке уменьшается. Твердость ВС соответствует твердости закиси железа. На основании химического и микроструктурного анализов, а также на основании измерений микро твердости и работ по

морфологии окисленных пленок, можно сделать вывод, что вновь образовавшаяся структура представляет собой химическое соединение железа с кислородом, в котором основной составляющей является FeO.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований позволяет представить схему образования ВС на ЭЖ покрытия при трении со сталью 45 в следующей последовательности. Осадки железа, полученные в результате электролиза, имеют в своем объеме достаточно количество водорода. Водород является одной из причин повышенной твердости осадков железа [8]. В процессе трения в точке контакта происходит микросхватывание, приводящее к локальному повышению температуры. Последнее способствует диффузии водорода из покрытия в зону контакта, разупрочнению контактируемых объемов железа и, тем самым, увеличению пластической деформации в точках контакта. Пластически деформированный слой осадка железа представляет собой среду с высокой концентрацией дефектов кристаллической решетки, в результате чего она является активной фазой к окружающей среде. Водород и окружающий воздух создают среду в зоне контакта, где создаются условия для образования закиси железа. Интенсивность износа при трении ЭЖ покрытия по чугуно имеет наибольшее значение при скорости скольжения 1,05 м/с. Испытания при больших скоростях показали износ покрытия на 2..3 порядка меньше. Как и при трении со сталью, на поверхности образцов, испытанных на износ с чугуном обнаруживаются ВС, которые достаточно полно экранируют исходный материал. В шлифе поперечного сечения поверхностного слоя испытанного образца, является достаточно пластичной. Ее деформация сопровождается своеобразным «перетеканием» по поверхности трения и контактирует с материалом контртела (чугуном). Данная структура располагает отдельными островками, которые разделены трещинами, что свидетельствует о хрупкости этой структуры.

Твердость структуры, расположенной непосредственно у деформированной части образца, соответствует $H_V^{20}=3,4...5,5$ ГПа, а твердость ВС, расположенных на поверхности трения, значительно больше - $H_V^{20}=10,9$ ГПа. На расстоянии 10...15 мкм от поверхности трения твердость падает до $H_V^{20}=3,5...4,0$ ГПа, и это соответствует слоистой ВС. Далее на расстоянии 20...25 мкм микротвердость уменьшается до $H_V^{20}=2,0$ ГПа и затем постепенно поднимается на длине 35... 40 мкм до значения $H_V^{20}=4,0$ ГПа, т.е. до исходной твердости покрытия.

Механизм изнашивания и процессы, происходящие в зоне контакта ЭЖ с чугуном, представляются в следующей последовательности: покрытия в процессе трения в точках контакта подвергается локальной деформации, и поэтому образуются мостики схватывания. Свободный углерод в фазе графита создает на поверхности покрытия пленочный экран. Графит, по данным [9], образует на поверхности защитную пленку, ориентированную в направлении скольжения, что приводит к снижению коэффициента трения и износа. В разрывах пленки, где нет графита, происходит многократное местное нагружение, в результате чего этот объем претерпевает деформацию, сопровождающую измельчение структуры нагружаемого места. Далее, оно упрочняется и под действием циклической нагрузки разрушается, и отделяется от поверхности покрытия. Пластическая и упругая деформация локальных участков поверхности способствует развитию активации поверхности [9] и ее взаимодействию со средой.

Наличие высокой температуры в местах контакта позволяет сделать вывод о полной реакции кислорода с железом, выражаемой появлением на поверхности оксида железа (Fe_2O_3), о чем свидетельствует измерение микротвердости. Этот окисел, имея высокую твердость ($H_V^{20}=11,2...12,0$ ГПа) и малую вязкость, подвергается циклическому нагружению на мягкой основе, каковой является подповерхностная структура, растрескивается и, отделяясь от нее, выносятся из зоны трения.

Изнашивание ЭЖ покрытия по бронзе Бр. ОЦС 4-4-2,5 значительно отличается от износа по стали и чугуно. Величина износа по бронзе в $10^2...10^3$ раз меньше, чем по стали. Сам процесс происходит значительно «мягче», без схватывания и без задиров. Приработка образца требует длительного времени – до 5 часов. На поверхности трения ЭЖ обнаруживается тончайший налет желтоовато-красного цвета. Изучение поверхностей трения под микроскопом и микротвердый анализ «цветных» участков показал, то на поверхности ЭЖ имеют место продукты переноса или износа бронзы. На малых и больших скоростях сетка трещин просматривается темным цветом, а на скоростях, соответствующим минимальному износу, сетка видна светлым цветом, т.е. около трещин происходит концентрация продуктов износа и переноса бронзы. В трещинах с сечением 1...2 мкм обнаруживаются включение красного цвета, что позволяет продолжить наличие в этих трещинах процесса микроэлектролиза меди. Некоторые участки покрытия имели на себе отдельные частицы бронзы размером 6-8 мкм, вырванные из материала контртела в результате схватывания. О явлении переноса бронзы или ее составляющих в процессе трения имеются данные, приведенные в [10]; существуют два мнения –

считать этот процесс как электролиз или же относить его к схватыванию. Некоторые исследователи считают этот процесс как электролиз, другие же относят это явление к схватыванию.

ЭЖ покрытия, которые применяются для восстановления изношенных деталей, имеют твердость HRC45-50. Эта твердость достигается режимами электролиза и сопровождается наличием в осадках микротрещин. Последние являются следствием внутренних напряжений в осадке. Естественно, покрытие может содержать в себе, т.е. в трещинах-порах, остатки электролита и допустить протекание процесса микроэлектролиза с осаждением меди вполне возможно. Металлографический анализ поперечного сечения поверхности трения выявил ВС, совершенно отличные от аналогичных при трении со сталью и чугуном. Толщина пленки ВС колебалась от 38 до 56 мкм. Пластической деформации подповерхностных слоев не обнаружено. Такой факт позволяет считать, что ВС являются продуктами не активации покрытия в виде деформации, а продуктами взаимодействия покрытия с бронзой. После травления ВС имеют 2 фазы – светло-желтого и сероватого цвета. Схватывание и образование микросвязей между покрытием и бронзой ведет к отрыву частиц и на покрытии, и на бронзе. Далее эта масса становится промежуточным материалом между трущимися поверхностями, активно смешивается, но химически не взаимодействует.

Выполнение исследования позволяют сделать вывод о том, что при трении ЭЖ покрытия с бронзой

изнашивание происходит в результате схватывания, отрываются микрочастицы. Механическое смешивание этих частиц в пространстве между трущимися поверхностями образует новую фазу, представляющую ВС.

Литература:

1. *Зайцев В.Ф.* «Машина для испытания осталенных образцов на износостойкость» Ф., «Мектеп», 1972, с.53.
2. *Костецкий Б.И.* Сопротивление изнашиванию деталей машин. Москва-Киев, «Машгиз», 1959, с.476.
3. *Мелков М.П.* «Твердое осталивание автотракторных деталей». М.: «Транспорт» 1971, с.224.
4. *Костецкий Б.И.* Поверхностная прочность материалов при трении. Киев, «Техника», 1976, с.296.
5. *Крагельский И.В.* трение и износ. М.; «Машиностроение», 1967, с.480.
6. *Топеха П.К.* Основные виды износа металлов. М.; «Машгиз», 1952, с.386.
7. *Ревякин В.П.* Исследование износостойкости гальванического железа и его сплавов. М.; «Изв.вузов», Физика, Т.1, 1958, с 143.
8. *Попов К.В.* Динамическое деформационное старение металлов и хрупкость водородного типа. Новосибирск, «Наука», 1969, с.401.
9. *Костецкий Б.И.*, Трение, смазка и износ в машинах. Киев, «Техника», 1970, с.396.
10. *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механические процессы при граничном трении. М.; «Наука», 1972, с.170.