

05.1;12

©1995

ОБРАЗОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ СТАЛИ ПО МЕДИ В ПРИСУТСТВИИ ФУЛЛЕРЕНА ИЛИ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ

*Б.М.Гинзбург, О.Ф.Киреенко,
Д.Г.Точильников, В.П.Булатов*

В данном сообщении приводятся результаты первых исследований влияния фуллерена (ФЛ) C_{60} или фуллереновой сажи (ФЛ-СЖ) (после экстрагирования из нее ФЛ) на процессы трения скольжения стали по меди.

Ранее на основании анализа поверхностей трения, соответствующих различным случаям аномально высокой износостойкости при трении медьсодержащих материалов по стали, предложена модель формирования износостойкой структуры поверхностных слоев в процессе трения [1]. Согласно этой модели для такой структуры характерно наличие очень тонкого внешнего слоя с высоким содержанием углерода (играющего защитную роль, т. е. пресекающего массоперенос при трении разнородных материалов) и более глубинного слоя толщиной 5–20 мкм с мелкодисперсной структурой медного материала (размер частиц 0.1–0.4 мкм), обеспечивающего под действием сдвиговых напряжений относительно легкое взаимное смещение и поворот частиц, т. е. бездислокационный механизм деформирования при поверхностного материала, не приводящий к зарождению и росту трещин (износу). При этом низкий коэффициент трения (~ 0.02) сохраняется даже в тяжело нагруженных узлах, практически в условиях сухого трения, когда смазка вытеснена из контакта.

При наличии на поверхности трения указанной износостойкой структуры должны проявляться следующие характерные признаки: низкий коэффициент трения в широком интервале прилагаемых нагрузок; отсутствие массопереноса с одного контртела на другое; характерный блеск поверхности медьсодержащих контртела и отсутствие частиц износа на поверхности трения и в смазке [1].

Перед проведением данного исследования предполагалось, что ФЛ вследствие своей высокой физико-химической активности и квазисферической формы молекул могут способствовать как образованию внешнего углеродного защит-

ного слоя на поверхности трения, так и более легкому взаимному смещению и повороту дисперсных частиц материала приповерхностного слоя при проникновении ФЛ в межчастичные прослойки.

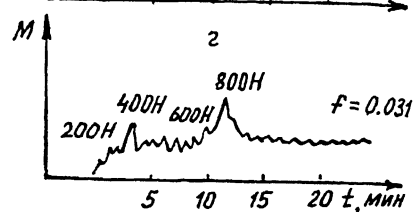
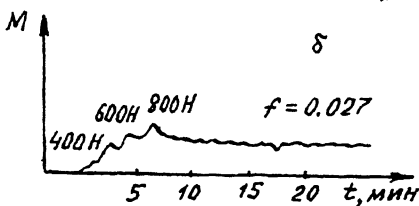
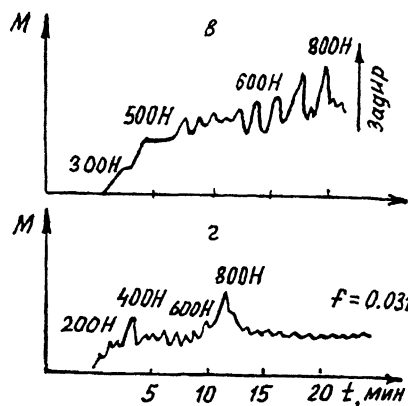
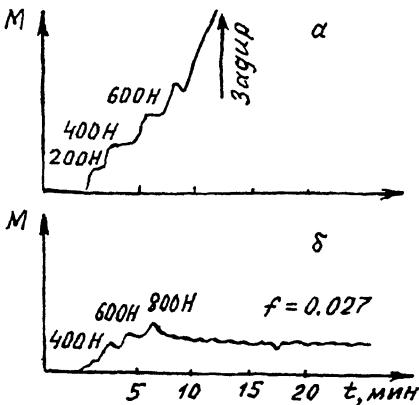
Предполагалось также ФЛ-СЖ, из которой экстрагированы ФЛ, тоже обладает повышенной активностью по сравнению с обычными сажами; возможно, в ней содержатся остаточные продукты незавершенных процессов формирования фуллеренов. Поэтому ФЛ-СЖ и обычные сажи марок П-514 и Т-900 использовались в качестве добавок к маслу для сравнительной оценки с эффективностью добавок фуллерена C_{60} .

При трибологических испытаниях использовали роликовую машину трения 2070-СМТ-1 и схему узла трения "ролик-колодка", обеспечивающую постоянную площадь контакта ($\sim 2 \text{ см}^2$). Исследуемые образцы представляли собой медные фольги промышленного производства. Они зажимались между роликом и колодкой так, что при вращении ролика трение происходило по границе раздела ролик-фольга. Смазкой служило индустриальное масло И-40А. ФЛ* вводили в масло в количестве 1–5 мас.% двумя способами: в молекулярно-диспергированном виде из раствора в толуоле и в порошковом виде с последующим механическим перемешиванием. Исследования показали, что наибольшее улучшение различных трибологических свойств получается при механическом введении. Поэтому ниже представлены только результаты механического введения ФЛ в масло. Аналогичным образом вводились сажи.

Капля смазки наносилась на поверхность фольги, затем подавалось и ступенчато увеличивалось давление до 4 МПа, т. е. до значений, характерных для тяжело нагруженных узлов трения.

На диаграммах нагружения (зависимостях момента трения M от времени) видно (см. рисунок, а, б), что присутствие ФЛ в смазке приводит к многократному возрастанию времени жизни узла трения (времени работы до задира при прекращении подачи смазки) по сравнению с работой на смазочном масле без ФЛ, к снижению коэффициента трения до уровня 0.02–0.04 по сравнению со значениями 0.08–0.12 для базового масла, к стабилизации работы узла трения (отсутствию резких пиков на диаграмме), а также к увеличению допустимой нагрузки, выше которой происходит задр. При этом поверхность трения меди приобретает блеск, характерный для образования на ней износостойкой

* ФЛ-СЖ получали в плазме электрической дуги в лаб. проф. Г.А. Дюжева. Из нее экстрагировали ФЛ и выделяли гомолог C_{60} (96–98%) в лаб. проф. В.П. Будтова.



Диаграммы нагружения узла трения при смазывании маслом И-40 (а), тем же маслом с добавкой 2.3 мас. % порошка фуллерена (б), тем же маслом с добавкой 3 мас. % фуллереновой сажи в обычном режиме (в) и с выходом на «фуллереновый» режим (z). M — момент трения в произв. ед., f — коэффициент трения.

структуры [1], отсутствуют следы переноса меди на стальном ролике (и наоборот), не наблюдаются частицы износа в смазке и на поверхности трения. Протираание ролика или замена смазки на базовую не нарушают стабильной работы узла трения, а коэффициент трения остается на том же низком уровне, что и при наличии ФЛ. Это свидетельствует об образовании износостойкой структуры, обеспечивающей работоспособность узла даже в условиях практически сухого трения. Кроме того, это означает, что молекулы ФЛ внедряются в поверхностные слои и уже в них, по-видимому, работают как «молекулярные катки», обеспечивая бездислокационную деформацию поверхностных слоев.

Судя по характерному блеску, при введении ФЛ в масло в виде порошка удастся получить износостойкую структуру на достаточно большой площади, охватывающей практически всю поверхность контакта, в отличие от других смазочных материалов, при использовании которых износостойкие структуры получались лишь на ограниченных участках поверхности трения.

При использовании в качестве добавки к смазочному маслу ФЛ-СЖ, как правило, не удастся выйти на трибохарактеристики, полученные при применении ФЛ. Коэффициенты трения при этом находятся в диапазоне 0.04–0.12 вместо 0.02–0.04 для ФЛ, задиp наблюдается при меньших нагрузках или раньше по времени, хотя определенное улучшение условий трения по сравнению с базовым маслом присадка ФЛ-СЖ все-таки дает, расширяя диапазон нагрузок, не приводящих к задиру. При этом для работы узла тре-

ния характерна нестабильная диаграмма (см. рисунок, в) с моногочисленными пиками, отражающими, по-видимому, процесс образования и удаления с поверхности трения слоев так называемых "вторичных структур", т. е. ФЛ-СЖ не обеспечивает образования на поверхности трения стабильного работоспособного углеродного слоя, как это делает ФЛ. Однако примерно в 25% случаев использования ФЛ-СЖ в качестве присадки к маслу наблюдается неожиданный эффект "срыва" диаграммы нагружения в области нагрузок 400–800 Н (см. рисунок, г). Момент трения резко снижается и коэффициент трения выходит на уровень, типичный для работы узла трения со смазкой, содержащей ФЛ (~ 0.03), исчезают характерные для сажи пики на диаграмме, сильно возрастает долговечность узла трения. Перед срывом на диаграмме трения наблюдаются сильные пики, что свидетельствует о наличии на поверхности трения процессов образования новых структур. Это позволяет считать, что наблюдаемый эффект не объясняется присутствием остаточного количества ФЛ в ФЛ-СЖ, так как концентрация его в смазе при этом ничтожно мала и недостаточна для образования защитного слоя, а кроме того, для присадки ФЛ характерен довольно спокойный ход изменения момента трения в процессе ступенчатого нагружения. Можно предположить, что при высоких локальных давлениях в области контакта и воздействии сдвиговых напряжений по аналогии с "наковальней Бриджмена" происходит существенная перестройка материалов на молекулярном уровне [2]. Можно предположить также, что в данном случае происходит образование ФЛ из ФЛ-СЖ или остатков фрагментов ФЛ в процессе трения. Гипотеза о "фуллеренизации" сажи при трении требует экспериментального подтверждения в дальнейшем. Следует отметить, что контрольные эксперименты с добавлением к маслам обычных саж к подобным эффектам не привели.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что добавление порошка ФЛ в смазочные масла (1–5 мас.%) или ФЛ-СЖ (при обеспечении не очень изученных пока условий выхода в "фуллереновый режим") существенно улучшает процесс формирования износостойкой структуры на поверхности трения меди в паре трения медь-сталь и существенно повышает характеристики трибоконтакта, особенно в области высоких нагрузок, обеспечивающих режим, близкий к сухому трению.

Работа выполнена в рамках Российской научно-технической программы "Фуллерены и атомные кластеры". Проект "Трибол".

Список литературы

- [1] *Киреевко О.Ф.* // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 1. С. 85-97.
[2] *Ениколопян Н.С.* // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 897-899.

Институт проблем
машиноведения РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
1 сентября 1995 г.
