

05;12
©1995

НАГРЕВ И РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНТАКТИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ

Ю.А.Фадин, Е.Б.Сёдакова, В.П.Булатов

Разрушение контактных поверхностей металлов при сухом трении скольжения с малыми скоростями происходит путем отслаивания [1]. Для этого необходимо, чтобы в приповерхностных слоях возникали горизонтальные трещины. Предполагается, что при трении такие трещины образуются из-за неоднородного по глубине напряженного состояния поверхностных слоев. Роль тепловых процессов в теории разрушения отслаиванием не рассматривается. Считается, что при высокоскоростном трении генерация тепла в поверхностных слоях столь существенна, что зачастую приводит к оплавлению всей контактной поверхности [2]. При трении металлов с малыми скоростями скольжения высокая температура может достигаться только в точках фактического контакта. Из-за реальной шероховатости исходных поверхностей общая площадь фактического контакта не превышает 1% от номинальной площади контакта. В этих же точках фактического контакта, особенно при сухом трении, возникает интенсивная пластическая деформация, которая охватывает тонкие, до 20 мкм, слои контактирующих тел, и разрушение поверхностей материалов в основном определяется механическими свойствами этих слоев [3]. Следует заметить, что толщины этого слоя со следами структурных перестроек определяется по микроскопическим данным, полученным уже после трения. Таким образом, действительная толщина контактирующих слоев, непосредственно участвующих в трении, и последовательность структурных изменений в них остаются неизвестными, поскольку сами слои уже не существуют во время исследования. Есть основания предполагать, что разрушение поверхностных слоев путем изнашивания, по крайней мере у металлов, происходит не равномерно, а дискретно. С помощью метода акустической эмиссии (АЭ) было показано, что сухое трение металлов сопровождается периодическим разрушением поверхностного слоя, причем периодичность разрушения хорошо согласуется с количеством и характерными размерами отделяемых частиц разрушения [4,5]. Однако в [4] влияние теплового ре-

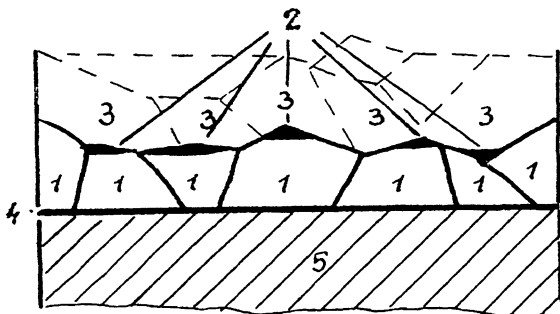


Рис. 1. Схема контакта поверхностей металлов при трении.

1 — зерна мягкого металла, 2 — горизонтальные трещины по границам первого слоя зерен, 3 — зерна последующих слоев, 4 — геометрическая поверхность контакта, 5 — твердый металл.

жима на поверхность контакта не рассматривалось. Можно предположить, что уже на начальной стадии трения в поверхностном слое возникают трещины, параллельные поверхности, и слой оказывается частично теплоизолированным от более глубоких слоев металла (рис. 1), в результате чего в некоторых областях слоя тепло, выделяющееся при трении, будет накапливаться. Цель настоящей работы состояла в совместном изучении разрушения и теплового режима поверхностного слоя в процессе непрерывного сухого трения металлов с малыми скоростями скольжения. Изучалось сухое трение пары латунь Л68—сталь 35. Трение проводилось по схеме: неподвижный латунный палец—вращающийся стальной диск. Средняя температура на контакте измерялась хромель—алюмелевыми термопарами (диаметр спая 0.5 мм), которые располагались в теле латунного образца на расстоянии 0.5 мм от геометрической поверхности контакта. Одновременно проводилась регистрация АЭ в двух частотных каналах (0.2–0.5 и 0.5–1.0 МГц) на установке, аналогичной [4]. Тепловой режим и разрушение слоя изучались только со стороны латунного образца. В результате исследований было обнаружено, что при сухом трении температура на поверхности контакта, так же как и АЭ, меняется периодически (рис. 2). Отрицательные пики температуры соответствуют максимумам активности АЭ \dot{N} (где \dot{N} — количество АЭ событий в единицу времени). По активности АЭ в реальном времени τ удобно определять интервалы времени между отрицательными температурными пиками. В дальнейшем будем называть этот временной интервал периодом разрушения поверхностного слоя при трении T_f . Средняя величина периода разрушения T_f зависит от нагрузки P и скорости скольжения v и имеет довольно

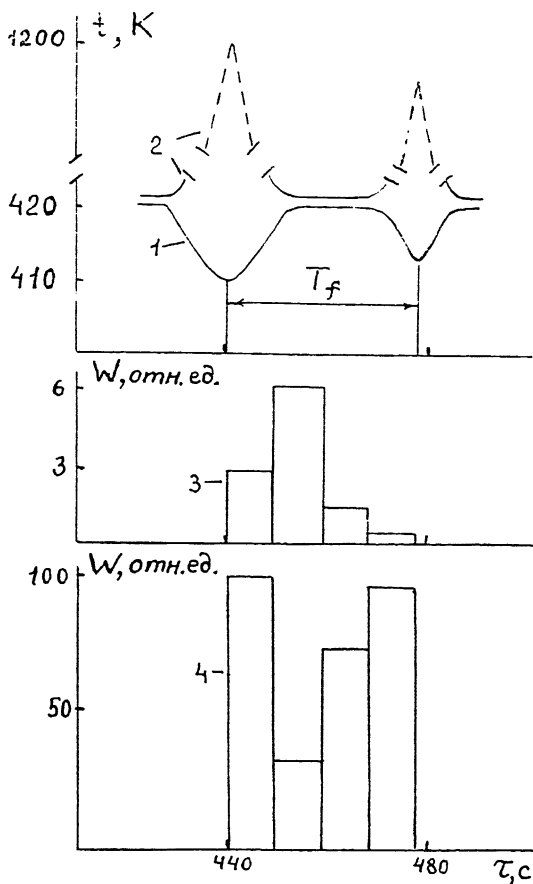


Рис. 2. Кинетика изменения температуры t и суммарной энергии акустической эмиссии W на поверхности латуни за один период разрушения $T_f \cdot P = 4$ МПа, $v = 0.6$ м/с.

1 — температура на расстоянии 0.5 мм от поверхности контакта, 2 — оценка температуры на геометрической поверхности контакта, 3 — гистограмма распределения W в диапазоне 0.5-1.0 МГц, 4 — гистограмма распределения W в диапазоне 0.2-0.5 МГц.

большой разброс. Так, для $P_1 = 4$ МПа и $v_1 = 0.6$ м/с период разрушения составил $T_{f1} = 40 \pm 10$ с, а для $P_2 = 2$ МПа и $v_2 = 0.3$ м/с соответственно $T_{f2} = 80 \pm 20$ с. Такой разброс T_f является обычным при испытаниях материалов на долговечность [6] и объясняется структурными различиями образцов. По-видимому, и при трении также наблюдаются подобные закономерности. Возможно, что наблюдаемое явление есть разновидность малоциклового усталости. Большой интерес представляет величина слоя лату-

ни, разрушаемого за один период T_f . Она определялась как отношение линейного износа образца за все время испытания к количеству периодов T_f . Средняя толщина слоя для T_{f_2} составила 16 мкм, а для T_{f_1} — 19 мкм. Металлографические исследования показали, что средний размер зерен α -латуни, используемой в настоящей работе, составляет 15 мкм. Это дает основание предположить, что за один период наблюдения T_f разрушается только один слой зерен поверхности латуни. Представляется, что наблюдаемый процесс разрушения поверхностного слоя происходит следующим образом. Известно, что α -латунь растрескивается по границам зерен при наклепе и при повышении температуры [7]. Обе эти причины имеют место при трении. О том, что в латуни происходит процесс трещинообразования, свидетельствуют данные АЭ. Система АЭ работает с низким коэффициентом усиления (40 дБ) и способна регистрировать только мощные источники АЭ. Кроме того, в те интервалы времени, когда не наблюдаются частицы разрушения, не регистрируются никаких сигналов АЭ. Известно, что чем меньше линейный размер источника АЭ, тем больше в его частотном спектре высокочастотных составляющих, и наоборот. Поэтому в диапазоне 0.5–1.0 МГц регистрируемая эмиссия соответствует меньшему линейному размеру АЭ источника, чем в диапазоне 0.2–0.5 МГц. Каждый T_f был разделен на четыре временных интервала, и в каждом из них подсчитывалась суммарная энергия сигналов АЭ W . В диапазоне 0.5–1.0 МГц в середине каждого периода W больше, чем в начале и конце (рис. 2), что объясняется тем, что зарождение трещин начинается сразу после выравнивания температуры на контакте и удаления остатков предыдущего слоя. В диапазоне 0.2–0.5 МГц, наоборот, основная W АЭ выделяется в моменты нарушения теплового равновесия (рис. 2), причем регистрируемые сигналы АЭ коррелируют с количеством отделяемых частиц. Сопоставляя данные АЭ с термограммой, можно предположить, что по мере появления трещин площадь сечения для передачи тепла уменьшается. Некоторые области контактного слоя теплоизолируются, и часть энергии трения, которая идет на нагрев материала, накапливается в контактном слое. С помощью термопар, расположенных на разных расстояниях от поверхности трения, можно в установившемся тепловом режиме оценить тепловой поток от теплопроизводящего слоя по формуле [8]

$$q = F\lambda\Delta t/l,$$

где F — площадь номинального контакта, λ — коэффициент теплопроводности α -латуни, Δt — разность температур в начальной и конечной точках пути теплового потока, l — длина теплового пути. Зная q , можно определить энерги-

ческую величину отрицательного теплового пика на рис. 2, что по оценке составляет ~ 1 Дж. Поглощение такого количества тепла в теплоизолированном за счет трещин слое толщиной 15–20 мкм может повысить температуру в нем более чем на 800 К (рис. 2, кривая 2). Такое резкое изменение температуры приводит к появлению значительных термических напряжений в тех участках слоя, которые соединены с основным металлом. Эти напряжения вызывают разрушение перемычек на срез и приводят к окончательному удалению остатков слоя. При этом среди частиц наблюдаются очень большие, состоящие из многих близлежащих зерен [9]. Далее процесс разрушения повторяется снова в следующем слое зерен.

Список литературы

- [1] *Sun N.P.* // *Wear*. 1973. V. 25. N 1. P. 111–124.
- [2] *Балакин В.А.* Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980.
- [3] *Поверхностная прочность материалов при трении.* Киев: Техника, 1976. 292 с.
- [4] *Фадин Ю.А., Лексовский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 10–13.
- [5] *Фадин Ю.А., Полевая О.В., Попов И.Н.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 17. С. 47–51.
- [6] *Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.В.* Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [7] *Бобылев А.В.* Растрескивание медных сплавов. М.: Металлургия, 1993. 352 с.
- [8] *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 512 с.
- [9] *Фадин Ю.А., Полевая О.В., Попов И.Н.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 22. С. 62–65.

Поступило в Редакцию
25 октября 1994 г.
