

05;12
©1994

РАЗМЕРЫ И ФОРМА ЧАСТИЦ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ МЕТАЛЛОВ

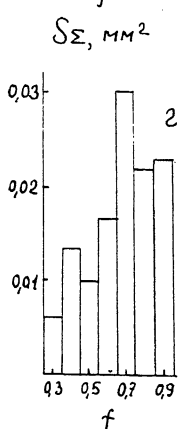
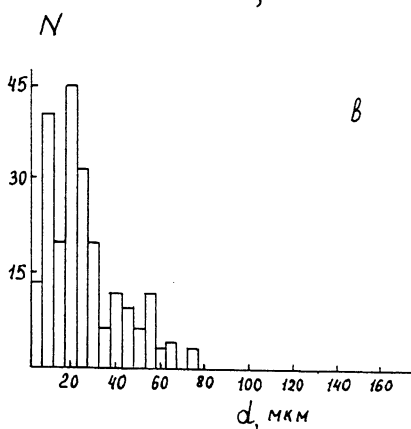
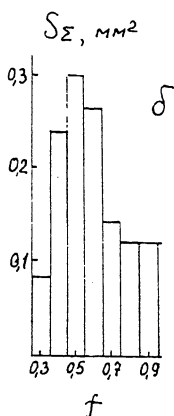
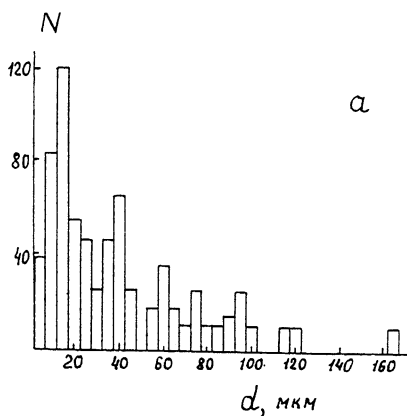
Ю.А.Фадин, О.В.Полевая, И.Н.Попов

Изучение сухого трения пары сталь-латунь по постоянному пути скольжения выявило периодические изменения интенсивности отделения частиц разрушения более мягкого металла [1,2]. Ранее сообщалось о наблюдении периодических структурных изменений в поверхностных слоях контактирующих металлов в подобных условиях испытания [3,4], однако изучение частиц в этих работах не проводилось. Между тем исследование частиц разрушения в реальном времени эксперимента может давать информацию, в том числе и оперативную, о развитии деформации в поверхностных слоях металлов при трении. Очевидно, что размеры отделяемых частиц каким-то образом соотносятся с размерами микротрещин в поверхностных слоях. Обработка данных о больших ансамблях частиц представляет собой очень трудоемкую задачу, поскольку включает в себя значительное число параметров. Решение этой задачи значительно упростилось в связи с развитием в последние годы методов компьютерного анализа изображений. Одна из простых методик такого рода описана в работе [1].

Цель настоящей работы состояла в изучении механизма разрушения поверхностных слоев при сухом трении мягкого металла на основании установления связи между параметрами образующихся частиц разрушения и исходным масштабом его структурных элементов.

Сбор и анализ частиц разрушения, образовавшихся в условиях сухого трения пары сталь-латунь при различных внешних давлениях и скоростях, проводились по описанной методике [1,2]. Это были частицы латуни, так как в процессе сухого трения мягкого металла по относительно жесткому первый интенсивно разрушается, уже на начальных стадиях процесса наблюдается фрикционный перенос латуни на сталь, и в дальнейшем трение происходит практически между латунными слоями. Интенсивность отделения частиц определялась как количество частиц, собранных в единицу времени (60 с).

Средний размер частиц в пробах, отобранных для исследования, менялся от 20 мкм при минимальной интенсивности отделения частиц до 60 мкм при максимальной ин-



Статистические распределения $N(d)$ и $S_{\Sigma}(f)$ в моменты максимальной (а, б) и минимальной (в, г) интенсивности отделения частиц. Давление 3 МПа, скорость 1 м/с.

тенсивности. Естественно предположить, что в моменты времени, соответствующие минимуму и максимуму интенсивности отделения частиц, происходят наибольшие структурные изменения в поверхностных слоях латуни. Чем в таком случае обусловлены наблюдаемые размеры частиц разрушения? Металлографический анализ показал, что исходный мягкий материал неподвижного контртела имеет характерную структуру α -латуни. При этом размеры зерен варьировались от 3 до 30 μm , а средний размер зерен составлял 15 μm .

Однако наиболее полную информацию о больших ансамблях частиц дают статистические распределения, а не средние величины. Поэтому были построены распределения всех исследуемых частиц по размерам. Оказалось, что

распределение частиц разрушения по размерам $N(d)$ представляет собой убывающую осциллирующую функцию (см. рисунок). Независимо от условий испытаний первый максимум попадает в один и тот же интервал значений размеров частиц — 15–20 мкм. Эта величина хорошо коррелирует со средним размером зерен в α -латуни. Все последующие максимумы расположены эквидистантно по отношению к первому. Этот факт означает, что линейные размеры некоторых частиц разрушения превосходят размеры зерен латуни в кратное число раз. Вероятно, указанные частицы разрушения представляют собой агломераты нескольких соседних зерен латуни. В моменты времени, соответствующие максимальной интенсивности отделения частиц, в распределениях (см. рисунок) появляются частицы со средними линейными размерами в 7–10 раз превышающими размер зерен в α -латуни. В моменты времени, соответствующие минимальной интенсивности отделения частиц, такие большие частицы не наблюдаются. Агломераты могут образовываться двумя путями: либо соседние зерна выстраиваются в цепочку, либо концентрируются вокруг общего центра. Количественно оценить это обстоятельство можно, используя понятие фактора формы частиц f , который в нашем случае определялся как $f = 4\pi S/l$, где S — площадь проекции частицы (изображения ее в поле зрения микроскопа), а l — периметр этой проекции. Так, частицам, проекция которых имеет форму круга, соответствует $f = 1$, для всех остальных $f < 1$. На рисунке приведены распределения суммарной площади $S_{\Sigma}(f)$ всех частиц в зависимости от заданного фактора формы. Видно, что максимальное приращение суммарной площади частиц разрушения в момент времени, соответствующий максимальной интенсивности отделения частиц, обеспечивается большими частицами сложной формы с $f < 0.5$. В момент времени, соответствующий минимальной интенсивности отделения частиц, наибольший вклад в увеличение общей площади частиц S_{Σ} вносят небольшие частицы с $f \simeq 1$. Эти данные дают объяснение обнаруженному в работе [1] факту изменения знака коэффициента корреляции r_{Sf} между общей площадью частиц S_{Σ} и фактором формы f в точках максимальной и минимальной интенсивности разрушения поверхностного слоя.

Согласно представлениям, отраженным в работе [5], пластическая деформация твердого тела в реальных условиях развивается одновременно на разных структурных уровнях. При этом для каждого материала может быть установлена иерархия структурных уровней и соответствующие им характерные размеры структурных элементов, участвующих в разрушении, в том числе и при трении [6]. На осно-

вании анализа частиц разрушения можно утверждать, что при сухом трении разрушение поверхностных слоев латуни происходит главным образом по границам зерен. Известно, что межзеренные границы являются зонами концентрации напряжения. В случае латуни напряженное состояние усиливается за счет охрупчивания границ зерен, чему способствуют следующие факторы. Во-первых, сильный наклеп поверхностных слоев латуни [7], происходящий при сухом трении из-за интенсивной пластической деформации. Во-вторых, значительный разогрев поверхности контакта $\approx 200^\circ \text{C}$, что также приводит к охрупчиванию межзеренных границ [7]. Как следствие, при трении можно ожидать появления микротрещин между границами зерен латуни, ориентированными перпендикулярно к направлению силы трения. Кроме того, микротрещины могут возникать в плоскостях, параллельных поверхности трения, под действием сдвиговых усилий. Эти обстоятельства приводят к тому, что по мере развития процесса трения в поверхностных слоях мягкого контртела возникают и накапливаются микротрещины, о чем свидетельствуют частицы разрушения небольших размеров и округлой формы. Факт этот хорошо согласуется с исследованиями особенностей разрушения металлов [8], где было показано, что размеры возникающих при пластической деформации микротрещин коррелируют с характерными масштабами структурных элементов исследуемого вещества. Массовое появление больших частиц сложной формы, объединяющих десятки зерен, свидетельствует о развитии в приповерхностных слоях процесса разрушения, аналогичного распространению магистральной трещины при объемном разрушении.

Авторы выражают благодарность Б.М. Гинзбургу за обсуждение результатов и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Фадин Ю.А., Полевая О.В., Попов И.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 22. С. 62-65.
- [2] Фадин Ю.А., Лексовский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 10-13.
- [3] Марченко Е.А., Непомнящий Е.Ф., Харач Г.М. // ДАН СССР. 1968. Т. 181. № 5. С. 1103-1104.
- [4] Жарин А.Л., Генкин В.А., Роман О.В. // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 2. С. 330-341.
- [5] Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинация в кристаллах. Л.: Наука. 1986. 224 с.

- [6] Рапопорт Л.С. // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 5. С. 786-792.
- [7] Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 416 с.
- [8] Бетехтин В.И., Владимиров В.И. // Проблемы прочности и пластичности твердых тел. Л., 1979. С. 142-154.

Поступило в Редакцию
14 июня 1994 г.
