

# Формирование полос локализованного сдвига в поверхностных слоях металлов при трении

© С.Ю. Тарасов, А.В. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
634021 Томск, Россия

E-mail: tsy@ispms.tsc.ru

(Поступила в Редакцию 10 июля 2007 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2007 г.)

Проведено исследование наноструктурирования поверхности образцов при трении в условиях сдвиговой неустойчивости подповерхностных слоев материала в результате сильной локализации деформации. Показано, что существуют три стадии локализации деформации в подповерхностных слоях. Изучена структура зоны локализации. Формирование нанокристаллического материала на поверхности в результате сдвиговой неустойчивости рассматривается аналогично формированию полосы локализованного сдвига. Образование нанокристаллического материала может служить причиной перехода от нормального к адгезионному типу изнашивания в отсутствие механизмов структурной приспособляемости.

Работа выполнена по проекту 3.6.1.2 Программы 3.6.1 фундаментальных исследований СО РАН и при поддержке РФФИ (грант № 06-08-00775-а).

PACS: 62.20.Qp, 62.20.Fe, 61.46.-w

## 1. Введение

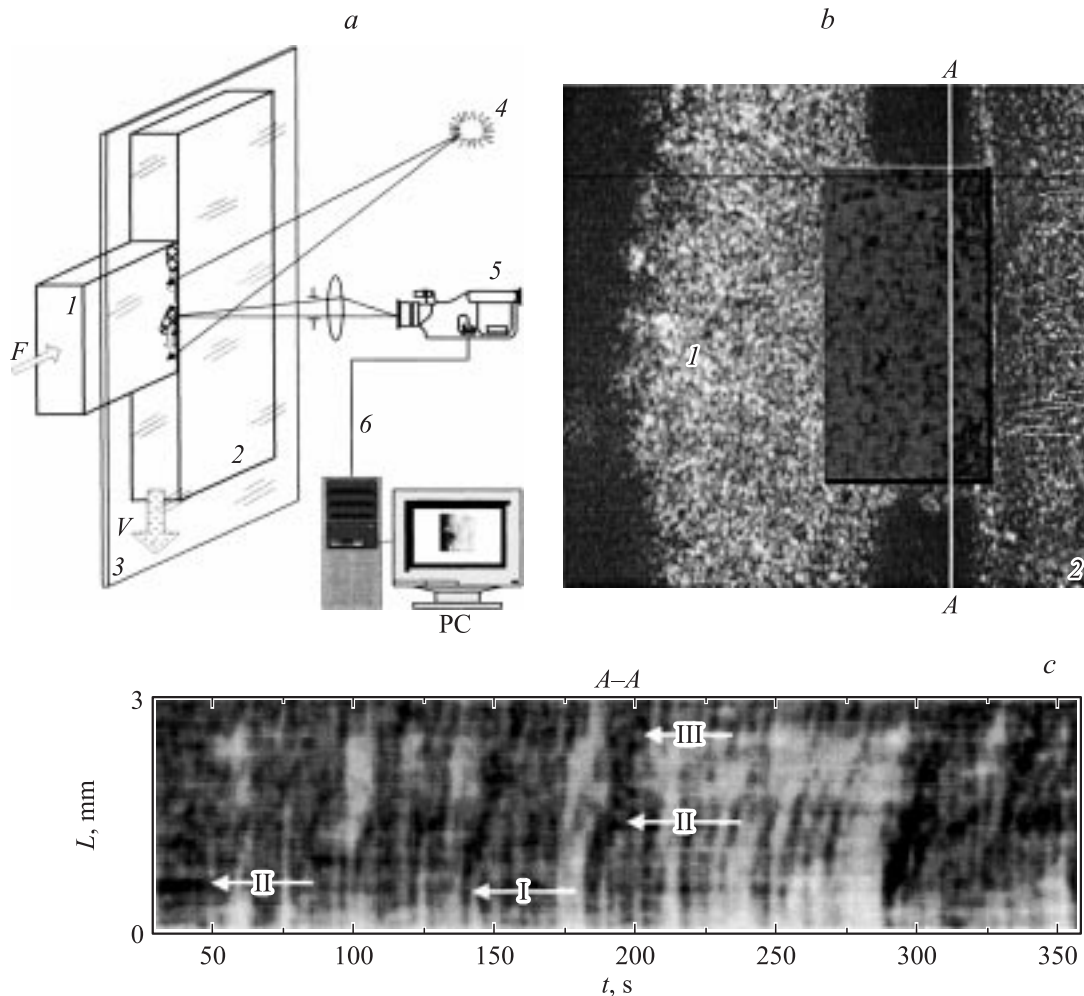
В связи с развитием технологий миниатюризации инструментов и машин возникает проблема передачи больших мощностей через микроконтакты, при этом материалы контактов находятся в критических условиях. Актуальной проблемой является поведение материалов в таких условиях и, в частности, при передаче механических усилий в процессе трения скольжения. Критическим режимом при этом называется режим перехода от нормального изнашивания к изнашиванию адгезионного типа. Процесс изнашивания в самом общем виде может быть нормальным или катастрофическим.

Связь деформации с износом прослеживалась в работах многих ученых. При этом предполагалось, что глубина деформации (или износ) линейно зависит от размера пятна контакта. Нормальное изнашивание может быть связано с деформацией на уровне микронеровностей (микроругн контакта) и малой глубины деформации, а катастрофическое – с ростом размера пятна контакта и глубины деформации. Такая модель не реализуется, когда в поверхностных слоях возникает сильнодеформированный (нанокристаллический) слой с резкой границей между ним и нижележащим материалом. Таким образом, определяющим фактором для изнашивания является не деформация отдельных зерен материала, а формирование мезоскопического образования — фрагментированного слоя, эволюция которого определяет конкретный механизм изнашивания. В литературе предложено несколько моделей его образования: за счет перемешивания частиц износа, адиабатического сдвига, вытягивания вершин неровностей и т.д. [1-4].

## 2. Постановка задачи и методология эксперимента

Предлагаемые в современной литературе модели формирования фрагментированного слоя при трении основаны на исследованиях материалов после остановки испытаний. При этом представляется невозможным оценить как кинетику, так и распределение деформации на предшествующей этому образованию стадии. Целью настоящей работы было *in situ* исследование стадий пластической деформации непосредственно перед образованием подповерхностного фрагментированного слоя в процессе трения скольжения. В связи с этим было изготовлено устройство для моделирования трения скольжения и наблюдения за деформацией предварительно полированной боковой поверхности неподвижного образца с помощью метода лазерной декорреляции спеклов. Боковая поверхность образца при этом освещается источником лазерного излучения, и на ней формируется картина спеклов, интенсивность которых меняется с подповерхностной деформацией образца и фиксируется с помощью цифровой видеокамеры. Таким образом, мы имеем возможность непосредственно в процессе трения наблюдать за деформацией на заданной глубине от поверхности. Более подробное описание эксперимента дано в работе [5].

После остановки эксперимента следы деформации на боковой поверхности изучались с помощью метода акустической силовой микроскопии (прибор Solver P47H), которая позволяет получать распределения упругих свойств в поле сканирования.



**Рис. 1.** Схема метода визуализации деформации при трении (*a*), реальная спекл-картина контакта на мониторе компьютера с зоной обчета (*b*) и хронограмма движения зон деформации в указанном сечении А–А (*c*). *I* — наблюдаемый неподвижный образец, латунь Л60; *2* — подвижный образец (контртело), сталь 45; *3* — стекло; *4* — источник освещения; *5* — видеокамера; *6* — РС. I–III — типы зон деформации.

### 3. Результаты эксперимента

В результате проведенных нами экспериментов по изучению деформации подповерхностных слоев меди и латуни в процессе трения с помощью метода лазерной декорреляции спеклов (рис. 1, *a, b*) [5] было установлено следующее.

1) Распределение деформации по боковой поверхности может носить случайный характер. При этом зоны деформации (тип I, рис. 1, *c*) могут возникать и исчезать либо двигаться как вдоль, так и поперек направления скольжения контртела.

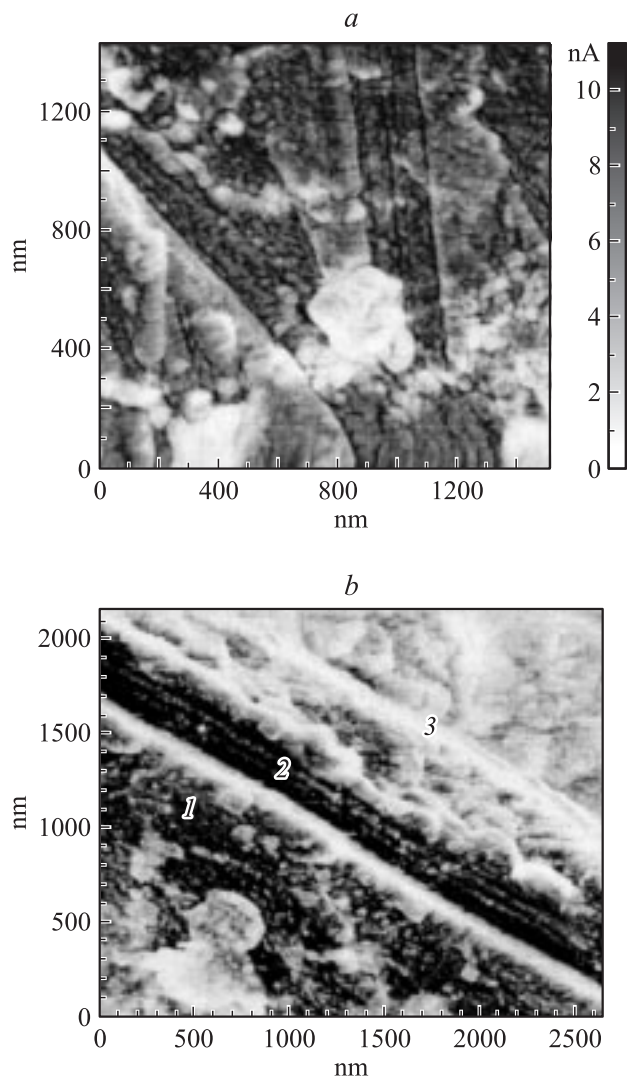
2) Могут возникать стационарные во времени и локализованные в определенном месте зоны деформации (тип II, рис. 1, *c*).

3) Стационарные (замороженные) зоны деформации могут вновь начать двигаться в результате превышения сдвиговым напряжением предела текучести материала поверхностного слоя с модифицированной структурой,

что соответствует моменту формирования поверхностной полосы локализованного сдвига (тип III, рис. 1, *c*).

Изучение структуры зоны локализации методом акустической силовой микроскопии, которая позволяет оценить распределение упругих свойств по области сканирования, показало, что вблизи поверхности формируются полосы локализованной деформации (ПЛД) (рис. 2, *a*). Степень деформации материала внутри этих полос весьма значительна, что подтверждается размером фрагментов около 20 нм. Ближе к поверхности трения наблюдаются участки материала с полностью нанокристаллической структурой и характерным слоистым строением (рис. 2, *b*).

Заключительной стадией этого процесса является формирование нового масштабного уровня деформации с характерным размером структурных элементов, составляющим десятки микрометров, что соответствует началу катастрофического изнашивания (рис. 3, *a*).



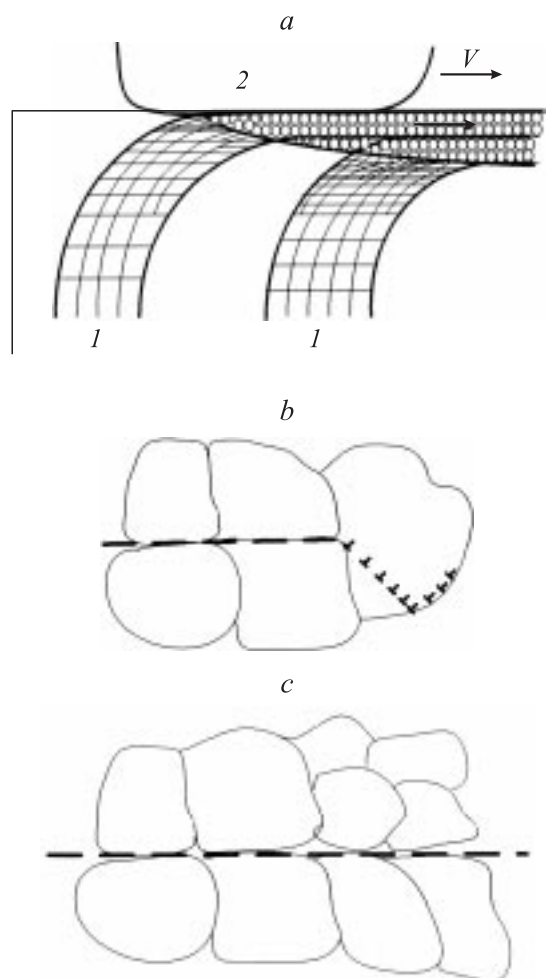
**Рис. 2.** Пересечение полос локализации деформации вблизи поверхности трения (*a*) и формирование нанокристаллического материала в результате сдвиговой неустойчивости (*b*). Темные области соответствуют участкам поверхности с меньшим значением модуля Юнга. 1 — зона пластической деформации, 2 — граница между зоной обычной пластической деформации и зоной локализованного сдвига, 3 — зона локализованного сдвига.

Картина распределения следов деформации по глубине от поверхности скольжения представляется следующей. При небольших контактных напряжениях происходит пластическое деформирование зерен металла так, что границы зерен и субзерен, а также полосы деформации становятся параллельными плоскости скольжения. При этом плоскости легкого скольжения  $\{111\}$  кристаллитов ориентируются также в направлении скорости скольжения, что обеспечивает наименьшие напряжения деформации. Сами границы представляют собой ПЛД в деформированном материале, возникшие в результате кристаллографического поворота и формирования текстуры. На рис. 2, *a* показано пересечение двух полос

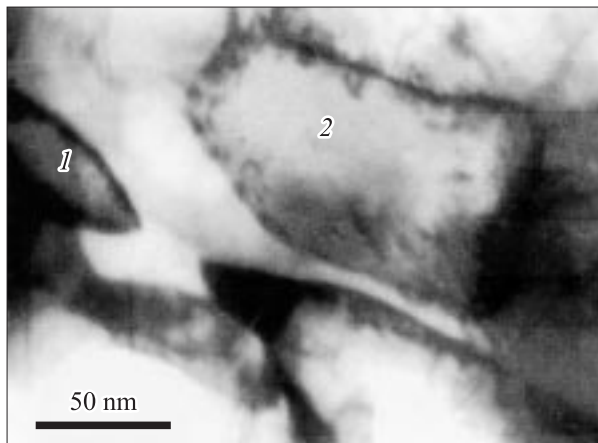
локализации деформации под углом примерно  $35^\circ$  с образованием более широкой ( $\sim 500$  nm) полосы. Из рисунка видно, что материал внутри полос сильно фрагментирован, а по краям полос и в месте пересечения наблюдается экструзия части материала.

#### 4. Обсуждение результатов

Как следует из представленных выше экспериментов, в поверхностных слоях деформируемого трением материала создается система ПЛД с постепенным возрастанием степени деформации от глубины к поверхности. Наибольшая степень фрагментации достигается на пересечениях таких полос, которые могут служить местом, в котором активизируется механизм зернограничного проскальзывания (ЗГП) и происходит сдвиг материала пятна контакта относительно соседних областей (рис. 3, *a*).



**Рис. 3.** Схема образования поверхностной полосы локализованного сдвига (*a*), схемы механизма обычного зернограничного проскальзывания (*b*) и течения материала по границе слоев (*c*). 1 — полосы локализации деформации, 2 — движущееся контртело, 3 — полоса локализованного сдвига.



**Рис. 4.** Формирование нанокристаллических зерен в результате процессов рекристаллизации и возврата в сильнодеформированном поверхностном слое. 1 — рост зерна посредством рекристаллизации, 2 — формирование границы субзерна за счет стока дислокаций.

В связи с этим размер фрагментов становится достаточным для активизации ротационного механизма деформации, и в этом месте формируется макрополоса с полностью нанокристаллической структурой и большим масштабом. Необходимо заметить, что масштаб (размер) этого дефекта связан с масштабом распределения напряжений по поверхности и локальная потеря сопротивления сдвигу может происходить и на микроуровне, вызывая малозаметные колебания силы трения, которые не выводят систему за пределы нормального режима. Формирование поверхностных нанокристаллических дефектов в масштабах от десятков микрометров может серьезно дестабилизировать режим трения и изнашивания и привести к катастрофическому режиму, когда дефект распространяется на всю номинальную площадь поверхности. Таким образом, можно выделить несколько стадий.

1) Локализация деформации в полосах скольжения, накопление дефектов, текстурирование и формирование ПЛД.

2) Формирование нанокристаллической структуры в ПЛД, активизация ЗГП и деформации в местах пересечения полос с поверхностью и друг с другом.

3) Формирование поверхностных полос локализованного сдвига в соответствующем масштабном уровне.

Механизм деформации образовавшейся макрополосы принципиально отличается от обычного пластического течения и представляется как течение квазивязкой жидкости или гранулированной среды [6]. С точки зрения металловедения существует только один механизм, который обеспечивал бы такое течение — это механизм ЗГП. В обычной схеме ЗГП зернограницные дислокации двигаются по границам, а на тройных стыках зерен напряжения аккомодируются за счет генерирования и движения дислокаций в лежащем на пути зерне

(рис. 3, *b*). Особенностью образования нанослоев при трении является их слоистая структура, и именно на границе слоев действует механизм ЗГП. В этом случае реализуется наиболее легкая схема движения, поскольку отсутствуют тройные стыки зерен (рис. 3, *b*).

Роль термического разупрочнения заключается не только в температурной зависимости предела текучести материала, как это обычно учитывают при моделировании. Деформационное упрочнение и термическое разупрочнение оказывают совместное действие на структуру материала. С одной стороны, температура способствует развитию процессов возврата и рекристаллизации материала (рис. 4), а с другой — понижает энергию активации ЗГП. В свою очередь образование границ слоев в такой среде тоже можно рассматривать как форму локализации деформации в виде полос локализованного сдвига. В результате формирования и дальнейшая деформация нанокристаллического материала происходят гораздо быстрее. Необходимо отметить, что, поскольку в таком состоянии материал обладает высокой диффузионной проницаемостью, в материалах, подверженных действию окружающей среды, на поверхности быстро формируются защитные пленки и тем самым понижается структурный уровень деформации.

## 5. Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований процессов локализации деформации и изменения структуры в поверхностных слоях трения предложена новая схема формирования дефекта поверхности при трении скольжения в условиях адгезионного взаимодействия. Данная схема включает процесс накопления деформации в ПЛД и следующую за ней потерю сдвигового сопротивления в зоне локализации за счет формирования нанокристаллической структуры (разупрочнения) в ПЛД. В условиях адгезионного взаимодействия данный процесс приводит к формированию нового масштабного уровня деформации — поверхностной полосы локализованного сдвига, которая также обладает нанокристаллической структурой и особым механизмом деформации, что способствует переходу к катастрофическому изнашиванию в отсутствие факторов, благоприятствующих снижению интенсивности трения.

## Список литературы

- [1] D.A. Rigney. *Wear* **245**, 1 (2000).
- [2] J.L. Young, D. Kuhlmann-Wilsdorf, R. Hull. *Wear* **246**, 74 (2000).
- [3] J. Hershberger, O.O. Ajayi, J. Zhang, H. Yoon, G.R. Fenske. *Wear* **258**, 1471 (2005).
- [4] В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев. *ЖТФ* **74**, 63 (2004).
- [5] С.Ю. Тарасов. *Металловедение и терм. обраб. металлов* **5**, 38 (2006).
- [6] J. Torok, S. Krishnamurti, J. Kertesz, S. Roux. *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3851 (2000).