

07,13

Сдвиговая неустойчивость в подповерхностном слое материала при трении

© С.Ю. Тарасов, В.Е. Рубцов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: tsy@ispms.ru

(Поступила в Редакцию 22 апреля 2010 г.
В окончательной редакции 19 мая 2010 г.)

Проведено исследование явления сдвиговой неустойчивости подповерхностных слоев материала при трении. По мере приближения из глубины металла к поверхности трения можно различить несколько характерных зон: зона пластической деформации и текстурирования (I), зона интенсивной фрагментации (II), зона турбулентного течения (III), зона ламинарного течения (VI). Зоны I и II можно назвать зонами обычной пластической деформации, тогда как зоны III и IV соответствуют зонам развития сдвиговой неустойчивости типа Кельвина–Гельмгольца на границе сдвига. Проведена оценка возможности реализации этого явления на основе гидродинамического подхода.

Работа выполнена по проекту III.20.2.4. „Изучение механизмов трения и эволюции структуры поверхностных слоев металлов, сплавов и композиционных материалов в различных условиях фрикционного контакта на основе многоуровневого подхода“ Программы III.20.2. „Научные основы создания материалов и покрытий с неравновесными структурно-фазовыми состояниями на основе многоуровневого подхода“ и при поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00200-а и 10-08-00629).

1. Введение

В настоящее время активно изучаются все аспекты получения нанокристаллических материалов методами глубокой пластической деформации. С практической точки зрения обычно ограничиваются получением субмикроструктурного размера зерна и связанного с этим изменением упругих и прочностных свойств материала. Существует интерес к исследованию деформационного поведения нанокристаллических материалов при высоких степенях деформации в отсутствие разрушения. Трибологический подход к решению этой задачи позволяет получить на одном образце набор структур, соответствующих различным степеням деформации — от исходного зерна до наноразмерного. Известен неоднородный характер деформации в поверхностных слоях при трении с высокими нагрузками, который заключается в образовании и течении слоя с нанокристаллической зеренно-субзеренной структурой [1]. Структурной особенностью такого слоя является гидродинамический характер течения вследствие развития сдвиговой неустойчивости в условиях упрочнения-разупрочнения. Сущность сдвиговой неустойчивости заключается в смене сдвиговой моды деформации на ротационную по механизму зернограничного проскальзывания либо ротационной рекристаллизации [2] или за счет диклинационного механизма [3], что связано с получением субмикронного размера зерна и динамической рекристаллизацией в ходе дальнейшей деформации. Явление сдвиговой неустойчивости в данных условиях представляет собой продукт критического изменения свойств и структуры материала и особенно часто наблюдается в металлах при

высоких скоростях нагружения при формировании полос локализованного сдвига [4].

Особый вид сдвиговой неустойчивости, описываемый как неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, наблюдается при косом соударении со скоростями $\sim 2.5\text{--}8.75\text{ mm}/\mu\text{s}$ на поверхностях алюминиевых, бериллиевых и медных пластин [5,6] и выражается в формировании волнообразных или вихревых возмущений на поверхности контакта пластин. Обнаружен эффект подавления сдвиговых возмущений за счет нанесения гальванических или электронно-лучевых покрытий. Приводится аргумент — образование полос локализованного сдвига (кратковременное разупрочнение) затрудняется по мере уменьшения исходного размера зерна, что может приводить к стабилизации неустойчивости.

Другим эффектом, ответственным за формирование вихреподобных неустойчивостей при высокоскоростном соударении, может быть механизм образования очагов пластичности за счет локализации деформации на предыдущей стадии и их развитие в вихревое течение [7].

В работе [8] на примере трения мягких сплавов Al–Sn и Cu–Pb показано, что вихревые структуры на поверхности трения могут формироваться и при низких скоростях в зонах локализации деформации путем механизма зарождения-роста в условиях термодинамической неустойчивости, при этом их оси параллельны направлению скольжения.

В работе [9] исследовалось высокоскоростное трение алюминия по стали. В этом случае вихревое течение и перемешивание материала наблюдалось на поверхности трения и было названо причиной формирования нанокристаллического слоя.

Целью настоящей работы является получение наноструктурированного поверхностного слоя при трении в условиях адгезионного взаимодействия, а также оценка макроскопических условий развития в нем вихревой неустойчивости с использованием гидродинамического подхода на основе результатов моделирования и экспериментальных данных.

2. Постановка задачи и методика эксперимента

В современной литературе [9] предлагаются модели постепенного образования нанокристаллического слоя при трении, которые учитывают только факторы деформации и/или перемешивания частиц износа в зоне трибологического контакта. Эти модели отражают традиционный подход. В то же время структура получаемых при трении слоев очень сильно напоминает структуру полос локализованного сдвига, получаемых в результате взрывного нагружения [10]. В ходе трибологического эксперимента можно моделировать условия, близкие и к тому и к другому подходу, в зависимости от скорости скольжения и реального размера одиночного контакта. В связи с этим трибологические эксперименты проводились в условиях, когда возникают резкие изменения коэффициента трения, связанные с развитием адгезионного типа изнашивания. При этом резко изменяется геометрия контакта и провоцируется развитие сдвиговой неустойчивости. Предварительные эксперименты позволили подобрать соответствующие режимы испытаний и размеры образцов.

Образцы диаметром 5 мм и длиной 20 мм вытачивались на токарном станке из заготовки меди М1 и испытывались методом палец-диск на машине трения 2168 УМТ-1 (Точприбор, Иваново). Для обеспечения устойчивости плоскости трения и снижения продольных колебаний системы трения согласно конструктивным особенностям установки одновременно устанавливались по три образца. Диск диаметром 320 мм, изготовленный из термообработанной стали 9ХС (64 HRC), служил контртелом. Образцы испытывались при следующих режимах: скорость скольжения 1 м/с, контактное давление 0,1 МПа (режим 1) и 0,6 м/с, 0,5 МПа (режим 2). Проведенные ранее испытания показали, что режим с малой скоростью скольжения и высоким контактным давлением является наиболее жестким для медных образцов. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Axiovert 200 MAT (Carl Zeiss) с использованием метода дифференциально-интерференционного контраста.

3. Результаты

В результате эксперимента на поверхности образцов были реализованы условия возникновения сдвиговой

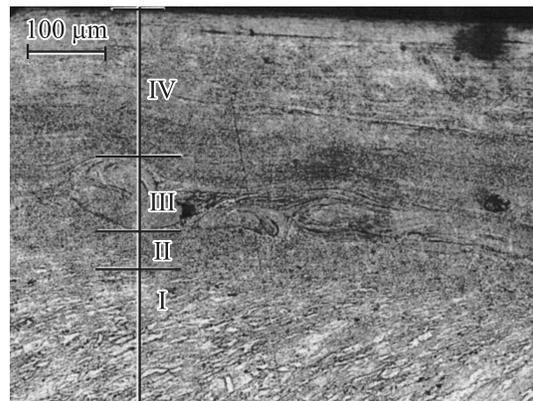


Рис. 1. Микроструктура зон пластической деформации на медном образце после трения в режиме 2 (0,6 м/с, 0,5 МПа). (I) зона пластической деформации и текстурирования, (II) зона фрагментации, (III) зона неустойчивости течения, (IV) зона ламинарного течения нанокристаллического материала. Нумерация зон — из глубины к поверхности.

неустойчивости (0,6 м/с, 0,5 МПа) и получен слой с наноразмерной зеренной структурой с четкой границей между ним и нижележащим деформированным материалом (рис. 1). Наличие четкой границы свидетельствует о сдвиговом характере образования такого слоя по механизму, подобному образованию полос локализованного сдвига. По мере приближения из глубины металла к поверхности трения можно различить несколько характерных зон: (I) зона пластической деформации и текстурирования, (II) зона интенсивной фрагментации, (III) зона турбулентного течения, (IV) зона ламинарного течения (рис. 1). Зоны I и II можно назвать зонами обычной пластической деформации, тогда как зоны III и IV соответствуют зонам развития сдвиговой неустойчивости в предварительно деформированном материале. Зоны пластической деформации I и II характеризуются кристаллографическим поворотом границ зерен в направлении действия сдвиговых напряжений (I) и вызванной этим интенсивной фрагментации (II).

Отличительной особенностью зон сдвиговой неустойчивости данного слоя является то, что они состоят из более мелкодисперсных фрагментов, которые организованы в субслои толщиной около 1 μm и вытянуты вдоль направления скольжения.

Другой важной морфологической особенностью является наличие зоны III, в которой наблюдается вихреобразное течение материала, напоминающее по внешнему виду зону турбулентного течения в жидкостях (рис. 2). Необходимо отметить, что вихревое течение материалов чаще всего наблюдается на поверхности трения [8] в результате механического перемешивания. В нашем случае оно наблюдается на некоторой глубине от поверхности, что связано со сдвиговым механизмом формирования нанокристаллического слоя. Кроме того, вихревое течение наблюдается также и в отдельных областях зоны IV,

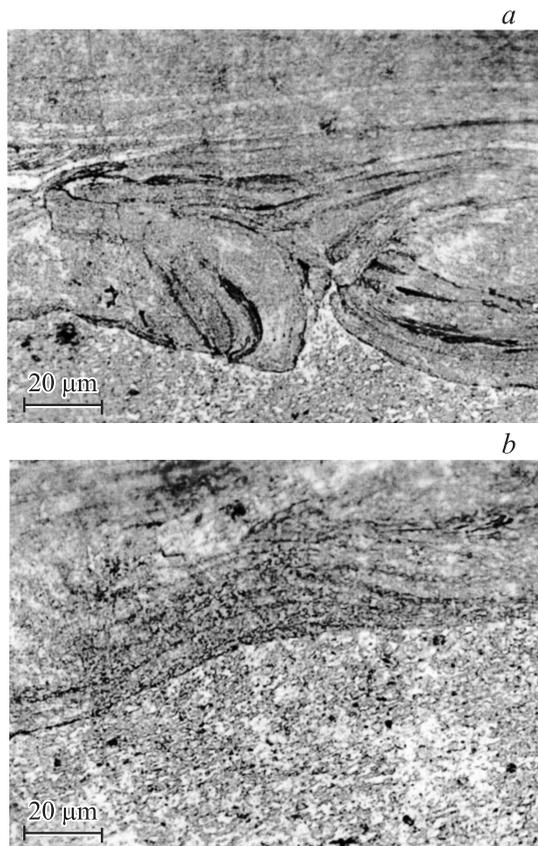


Рис. 2. Зоны турбулентного (а) и ламинарного (b) течения на границе сдвиговой неустойчивости.

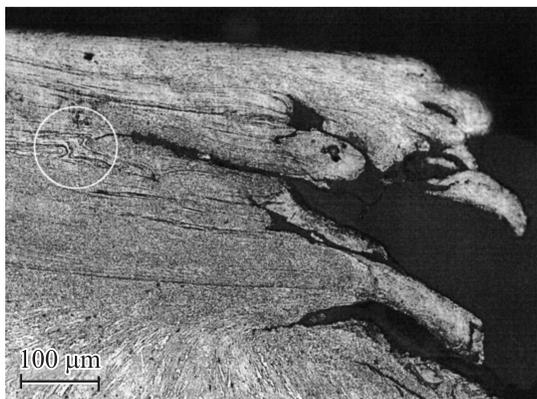


Рис. 3. Течение материала на краю образца. Область, в которой наблюдается вихревой характер течения субслоев, выделена кружком.

состоящей в свою очередь из субслоев микронной толщины (рис. 3).

4. Обсуждение

Картина пластической деформации наноструктурированного поверхностного слоя, наблюдаемая на боковой

поверхности образца, напоминает мгновенный „снимок“ течения потока жидкости. Границы, отвечающие сдвигу материала в направлении, параллельном поверхности трения, подобны линиям тока в ламинарном потоке, а области, в которых возникают ротационные моды деформации, напоминают вихри, возникающие при турбулентном течении (рис. 2, 3). Если в качестве основного механизма пластической деформации наноструктурированного материала рассматривать зернограничное проскальзывание, то материал подповерхностного слоя становится еще более схожим с жидкостью — наноразмерные элементы структуры способны как к поступательному, так и вращательному движению и в этом смысле также подобны частицам жидкости.

Как отмечено в работе [11], поликристаллы, которые деформируются по механизму зернограничного скольжения с диффузионной аккомодацией, ведут себя так же, как если бы они обладали ньютоновской вязкостью. Таким образом, можно оценить возможность возникновения турбулизации в поверхностном слое с позиций гидродинамики, рассматривая процесс его пластического деформирования как течение вязкой жидкости, находящейся между двумя параллельными пластинами, одна из которых неподвижна, а другая движется параллельно первой (течение Куэтта). Режим течения жидкости характеризуется числом Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho L \bar{V}}{\eta}, \quad (1)$$

где ρ — плотность, L — характерный размер, \bar{V} — средняя скорость потока, η — вязкость. В теории течения Куэтта принято считать абсолютно устойчивым относительно бесконечно малых возмущений [12], однако на практике при значениях числа Рейнольдса порядка 10^3 наблюдается переход от ламинарного к турбулентному режиму течения. Для получения оценки максимального значения числа Рейнольдса при деформировании наноструктурированного поверхностного слоя можно принять, что весь слой движется со средней скоростью, равной скорости контртела. В этом случае величина L будет равна экспериментально наблюдаемой толщине слоя $\approx 500 \mu\text{m}$, а \bar{V} равна скорости контртела, примерно 1 м/с.

При деформировании по механизму зернограничного скольжения деформация и, как следствие, вязкость контролируются диффузией по границам зерен. В этом случае вязкость можно найти из соотношения Кoble для диффузионной ползучести [11]

$$\eta_B = \frac{1}{C_1} \frac{d^3 k T}{\delta D_B \omega}, \quad (2)$$

где d — средний размер зерна, k — постоянная Больцмана, T — температура, δ — толщина межзеренной границы, Ω — атомарный объем, D_B — коэффициент зернограничной диффузии, C_1 — безразмерный коэффициент (для зерна равноосной формы $\approx 10^2$ [11]).

Средний размер зерна и толщина межзеренной границы, наблюдаемые экспериментально, составляют величины порядка 100 и 10 нм соответственно. Температуру непосредственно в поверхностном слое оценить довольно трудно, можно лишь сказать, что она должна быть не менее 200°C, так как измеренная с использованием термопары температура на расстоянии 1 мм от поверхности в схожих условиях трения составила $\approx 160^\circ\text{C}$ [13]. Также, по-видимому, температура не должна быть более 300–400°C. Такая температура, с одной стороны, достаточно высока для интенсификации диффузии по границам зерен, обеспечивающей зернограницное проскальзывание. С другой стороны, она достаточно низка для того, чтобы при охлаждении образца после окончания испытания „заморозить“ возникшую в поверхностном слое нанокристаллическую структуру. Коэффициент зернограницной диффузии D_B , рассчитанный из соотношения Аррениуса по значениям фактора диффузии и энергии активации для нанокристаллической меди, приведенный в [14], в интересующем нас интервале температур 200–400°C составляет величины порядка 10^{-12} – 10^{-10} м²/с. При данных значениях температуры и коэффициента диффузии из формулы (2) для минимальной вязкости получим $\approx 5 \cdot 10^4$ Па · с.

Моделирование сухого трения скольжения меди показало, что при сдвиговом напряжении $\tau \approx 200$ МПа скорость пластического сдвига $\dot{\gamma}$ достигает 10^3 с⁻¹ [15]. Для ньютоновской жидкости вязкость можно найти как отношение сдвигового напряжения к скорости сдвиговой деформации

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (3)$$

Подставив в (3) значения τ и $\dot{\gamma}$, получим вязкость $\approx 2 \cdot 10^5$ Па · с, близкую к найденной выше.

Для таких значений вязкости число Рейнольдса, рассчитанное по формуле (1), составит величину порядка 10^{-5} . С точки зрения гидродинамики при столь малых числах Рейнольдса возможно только невозмущенное, ламинарное пластическое течение наноструктурированного поверхностного слоя, любые бесконечно малые возмущения в нем будут быстро затухать [12].

Следует отметить, однако, что теория Рейнольдса справедлива только для бесконечно малых возмущений, в то время как сама структура поликристаллического материала уже предполагает неоднородность его свойств, а условия трения — неоднородность механического и термического воздействия. В таком случае пластическое течение также может быть неоднородным. Это подтверждают результаты моделирования. Расчеты трения скольжения с использованием одномерной макроскопической модели, выполненные для медного образца, показали, что пластический сдвиг в поверхностном слое развивается нестационарно во времени и неоднородно по глубине [15]. А наблюдаемое поле скоростей существенно отличается от линейного профиля, которым характеризуется течение Куэтта [12]. На рис. 4 приведена картина распределения скоростей по

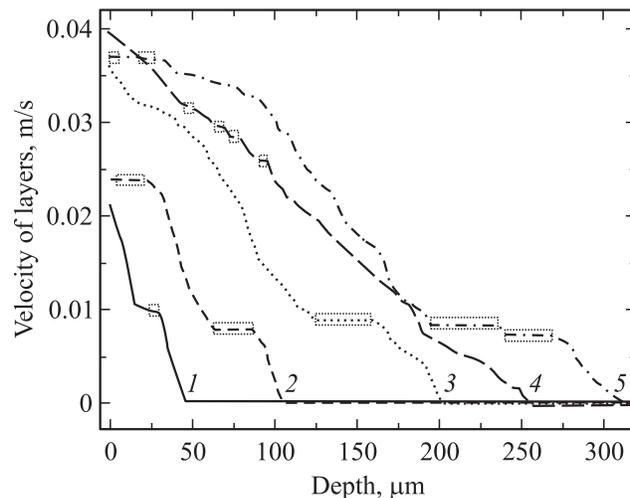


Рис. 4. Распределение скоростей в поверхностном слое материала по глубине начиная от поверхности. Кривые 1–5 соответствуют различным моментам времени [15].

глубине, полученная при моделировании. Как видно из рисунка, при деформировании материала в поверхностном слое происходит его разделение по скоростям на области двух типов. Области с высоким градиентом скоростей (наклонные участки кривых) отвечают зонам сдвиговой неустойчивости и интенсивности пластически деформируются. Другие области, с нулевым градиентом скоростей (горизонтальные участки кривых, выделенные прямоугольниками), движутся параллельно поверхности трения с одинаковой скоростью как единое целое, и деформация внутри таких областей остается упругой. Следовательно, в поверхностном слое в различные моменты времени (рис. 4, кривые 1–5) на различной глубине на границах упругих и пластически деформированных областей существуют поверхности тангенциального разрыва скорости. С точки зрения гидродинамики на таких поверхностях имеет место абсолютная неустойчивость, представляющая собой простейший случай неустойчивости Гельмгольца — абсолютной неустойчивости специального типа поверхностей раздела, отделяющих друг от друга области течения, заполненные одной и той же или разными жидкостями, движущимися с разной скоростью [12]. Еще одна поверхность, на которой имеет место неустойчивость Гельмгольца — граница между поверхностным слоем и упругодеформированным основным материалом.

Таким образом, в поверхностном слое в каждый момент времени должна существовать одна или несколько поверхностей, на которых возможно развитие турбулентности. И турбулентность действительно наблюдается экспериментально (рис. 2) — как внутри наноструктурированного слоя, так и на границе раздела между ним и основным материалом.

Учитывая полученные при моделировании свидетельства неоднородности пластического сдвига в поверхност-

ном слое, можно еще раз попытаться применить критерий Рейнольдса для оценки возможности возникновения турбулентности. Только применять его необходимо уже на более низком масштабном уровне — для относительного движения слоев материала толщиной $1 \mu\text{m}$.

По определению самого Рейнольдса его критерий можно записать в виде [16]

$$\text{Re} = \frac{Vh}{c\lambda}, \quad (4)$$

где V — скорость потока, h — характерный размер потока, c — скорость молекул, λ — средний пробег молекул. В нашем случае V и h представляют собой среднюю скорость движения и толщину поверхностного слоя. В модели элементарным носителем деформации является слой материала толщиной $1 \mu\text{m}$, поэтому параметры c и λ можно интерпретировать соответственно как скорость и перемещение этого слоя за то время, пока он находится в зоне интенсивного пластического сдвига. Из результатов моделирования можно получить следующие оценки для указанных выше параметров: $V \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, $h \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $c \approx 1 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, $\lambda \approx 1 \cdot 10^{-8} - 8 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ [15]. Тогда число Рейнольдса, рассчитанное по формуле (4), будет равно 1875–30 000. При таких значениях Re плоскопараллельные течения, к которым относится моделируемая система, описывающая деформирование поверхностного слоя, становятся нестабильными, и любое бесконечно малое возмущение приводит к развитию турбулентности.

5. Заключение

В ходе трибологического эксперимента реализованы условия сдвиговой неустойчивости и на поверхности трения получен слой материала с наноразмерной зеренной структурой. Наблюдаемая в сформировавшемся слое картина пластической деформации свидетельствуют о действии механизма течения, сходного с механизмом течения потока жидкости. Одной из особенностей его строения является наличие вихревых структур как внутри самого слоя, так и на границе раздела с основным материалом.

Макроскопический анализ пластического деформирования поверхностного слоя как течения вязкой ньютоновской жидкости, проведенный без явного учета механизмов деформации, показал, что если рассматривать движение такого слоя как идеальное плоскопараллельное течение, то с точки зрения гидродинамики для меди в данных условиях трения течение должно быть абсолютно устойчивым, т.е. ламинарным.

Картина меняется на абсолютно противоположную, если принять во внимание обнаруженный при моделировании неоднородный по глубине и нестационарный по времени характер сдвигового деформирования поверхностного слоя. В этом случае в поверхностном слое на

разной глубине в различные моменты времени может присутствовать одна или несколько поверхностей тангенциального разрыва скорости, которые представляют собой случаи абсолютной неустойчивости Гельмгольца и являются потенциальными зонами развития турбулентности. Возможность возникновения в таких зонах вихревых структур подтверждается также полученными оценками числа Рейнольдса.

Список литературы

- [1] S.Yu. Tarassov, A.V. Kolubaev. *Wear* **231**, 228 (1999).
- [2] M.A. Meyers, H.R. Pak. *Acta Metall.* **34**, 2493 (1986).
- [3] S.V. Bobylev, A.K. Mukherjee, I.A. Ovid'ko. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **19**, 103 (2009).
- [4] С.Ю. Тарасов, А.В. Колубаев. *ФТТ* **50**, 811 (2008).
- [5] О.Б. Дреннов. *ЖТФ* **69**, 38 (1999).
- [6] А.Л. Михайлов. *Физ. мезомехан.* **10**, 53 (2007).
- [7] В.Г. Морозов, С.А. Савельев, Ю.И. Мещеряков, Н.И. Жигачева, Б.К. Барахтин. *Физ. и механ. матер.* **8**, 8 (2009).
- [8] R. Schouwenaars, V.H. Jacobo, A. Ortiz. *Wear* **263**, 727 (2007).
- [9] D.A. Rigney, Hong-Jin Kim, A. Emge, R.E. Winter, P.T. Keightley, Woo-kyun Kim, M.L. Falk. *Acta Mater.* **57**, 5270 (2009).
- [10] Y. Xu, H.J. Yang, M.A. Meyers. *Scripta Mater.* **58**, 691 (2009).
- [11] R. Raj, M.F. Ashby. *Metallurgical Trans.* **2**, 1113 (1971).
- [12] А.С. Монин, А.М. Яглом. *Статистическая гидромеханика*. Наука, М. (1967). Т. 1. 640 с.
- [13] С.Ю. Тарасов. *Структурные изменения в металлических материалах в условиях адгезионного трения*. Докт. дис. Томск (2008). 282 с.
- [14] Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев, Г.П. Грабовецкая, А.П. Жилиев, Е.Ф. Дударев, К.В. Иванов, М.Б. Иванов, О.А. Кашин, Е.В. Найденкин. *Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов*. Наука, Новосибирск (2001). 232 с.
- [15] S. Tarasov, V. Rubtsov, A. Kolubaev. *Wear* **268**, 59 (2010).
- [16] Проблемы турбулентности. Сб. ст. / Под ред. М.А. Великанова, Н.Т. Швейковского. ОНТИ, М.—Л. (1936). 332 с.