

01;05;12

Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе

© В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
e-mail: root@ispms.tomsk.ru

(Поступило в Редакцию 11 марта 2004 г.)

С использованием одномерной макроскопической модели выполнен анализ пластического деформирования материалов без покрытия, с твердым покрытием, с пластичным упрочняющимся покрытием и с пластичным неупрочняющимся покрытием при трении. В результате расчетов установлена возможность возбуждения в трибологической системе механических колебаний, а также показано, что их частота резко уменьшается при переходе от упругого к пластическому деформированию. Показано, что одной из причин развития пластической деформации в поверхностном слое, а также в подслое материала под твердым покрытием может быть снижение упругих свойств материала вследствие фрикционного нагрева. Интенсивный пластический сдвиг в материале под твердым покрытием, может приводить к его разрушению из-за несовместности деформаций покрытия и основы.

Введение

Трение — широко распространенный физико-механический процесс, который связан с контактированием поверхностей в самых разнообразных своих проявлениях. Мы сталкиваемся с ним, когда балансируем на скользкой дорожке, удерживая равновесие, когда пытаемся реанимировать свой старый автомобиль чудотворными присадками к смазочным жидкостям, когда стоим перед выбором материала, необходимого для изготовления деталей конструируемого механизма, и во множестве других случаев. Но если большинство процессов, обусловленных взаимодействием и движением элементов системы, подчиняются фундаментальным законам, на основании которых можно прогнозировать поведение рассматриваемой системы, то трение вносит неопределенность, зависящую от множества факторов, связанных закономерностями, определяемыми эмпирически. Чтобы учесть все закономерности, характеризующие поведение трущихся пар, необходимо опираться на достижения физики поверхности, механики контактных явлений, физики прочности и пластичности материалов, механохимии, электрохимии и многих других наук. Учесть все явные и неявные факторы с точки зрения здравого смысла невозможно. Поэтому наиболее реалистичный подход к пониманию процессов трения и связанного с ним износа основан на последовательном изучении отдельных сторон данного явления, когда можно выделить основные параметры, определяющие состояние конкретной трибологической пары.

С точки зрения физики наиболее значимой представляется проблема деградации поверхностного слоя материала, решение которой должно быть основано на понимании ведущей роли пластической деформации при трении и факторов, влияющих на нее. К такому в первую очередь следует отнести динамические

процессы. Показателем динамического характера процесса трения являются макроскопические механические колебания, возникающие во фрикционной системе при скольжении. В работе [1] установлено, что при трении одной из причин формирования деформированного приповерхностного слоя являются механические и тепловые возбуждения, распространяющиеся в глубь среды и обусловленные переходом системы трения в автоколебательное состояние с большой амплитудой механических колебаний. В этом случае на поверхности трения и в некотором подповерхностном слое материала будут иметь место колебания температуры, в результате чего может развиваться процесс термоциклической ползучести, а также фазовые и структурные превращения материала.

В последнее время к динамическим процессам проявляется повышенный интерес, они достаточно широко исследуются и экспериментально, и теоретически. Исследования проводятся с целью изучения причин возникновения колебаний в трибосистеме, условий стабильности различных колебательных режимов, выявления критических значений параметров и их сочетаний, переводящих систему в тот или иной режим трения.

В процессе контактного взаимодействия, особенно в случае сухого трения, экспериментально наблюдаются квазипериодические либо периодические изменения скорости относительного перемещения поверхностей. На макроуровне это проявляется в виде релаксационных либо квазигармонических фрикционных автоколебаний. Существует несколько подходов к объяснению причин возникновения колебаний в системе трения. Все они связывают развитие колебаний с изменением коэффициента трения в процессе фрикционного взаимодействия. Один из подходов объясняет возникновение колебаний падающей нелинейной зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения [2]. В другой модели сила

трения считается независимой от скорости и предполагается, что фрикционные автоколебания развиваются вследствие положительной разности между силой трения покоя и силой трения скольжения [3]. Третий подход предлагает учитывать как положительную разность между силами трения покоя и скольжения, так и изменение силы трения с изменением скорости [4]. Экспериментальными исследованиями доказано, что значительную роль в возникновении фрикционных автоколебаний играют реологические явления на контакте [5]. В частности, в работе [6] процесс возникновения фрикционных автоколебаний связывается с изменением характеристик трения за счет тепловых процессов. Модель предполагает, что в цикле колебаний разогрев поверхностей трения на этапе относительного скольжения приводит к уменьшению коэффициента трения, а на этапе относительного покоя поверхность охлаждается и коэффициент трения возрастает. Падение коэффициента трения с ростом температуры действительно наблюдается экспериментально.

Динамический характер процесса трения проявляется не только в макро-, но и в микроскопическом масштабе. На микроуровне изменение силы трения происходит вследствие явления, которое в литературе принято называть „stick-slip motion“. В случае „stick-slip motion“ относительное движение двух поверхностей происходит не непрерывно, а состоит из последовательных циклов прилипания–проскальзывание [7]. Механизм такого колебательного движения поверхностей при трении до конца не изучен, но большинство исследователей склоняются к мнению, что он также связан с зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения [8].

Модель трибологического контакта

В предлагаемой статье выполнен теоретический анализ динамического поведения трибологического контакта, которое определяет упругопластическое деформирование поверхностных слоев материала при трении с использованием одномерной макроскопической модели. Степень деформации приповерхностных слоев и характер распространения деформации в объем образца определялись с учетом изменения его свойств вследствие деформационного упрочнения и фрикционного нагрева.

С макроскопической точки зрения сформировавшаяся структура и свойства материала в пределах пятна касания являются практически однородными в направлении, параллельном поверхности трения, и меняются только в зависимости от расстояния до нее. Поэтому при исследовании сдвиговой деформации в поверхностном слое материала в простейшем случае можно ограничиться одномерным приближением. Построенная модель является макроскопической, но не в смысле пространственного масштаба, а в том, что она явно не учитывает структуру и механизм деформации описываемой среды и оперирует только с ее макроскопическими характеристиками.

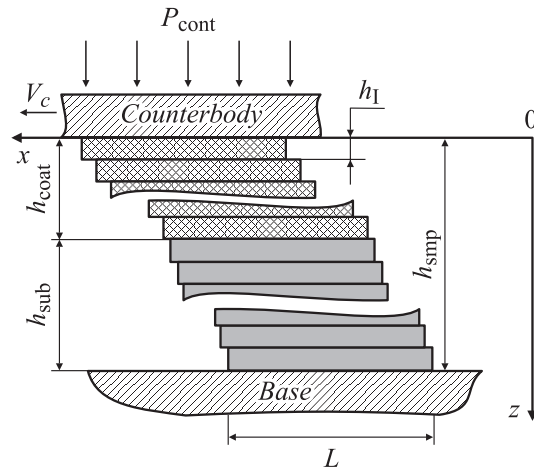


Рис. 1. Моделируемая система.

Фрикционное взаимодействие учитывали в пределах единичного пятна касания, представленного в виде микровыступа на поверхности, который состоит из набора слоев, в общем случае имеющих различные физико-механические свойства (рис. 1). Отклик системы на внешнее воздействие определяется свойствами слоев, составляющих микровыступ, и законами взаимодействия между ними. Такой подход позволяет описывать и произвольно задавать градиент свойств в материале микровыступа, а также „конструировать“ его из нескольких материалов с различными свойствами. Слои полагаются абсолютно жесткими, имеют одинаковые длину вдоль поверхности L и толщину h_1 . Сжатие образца под действием нормального давления P_{cont} в модели явно не учитывается. Предполагается, что нормальное напряжение постоянно по всей высоте микровыступа и равно нормальному давлению на контакте. Величина нормального напряжения учитывается при расчете критерия пластичности.

В микровыступе под действием силы трения может происходить сдвиг, который в модели реализуется посредством смещения слоев относительно друг друга в направлении, параллельном поверхности трения. Элементарным носителем сдвига является пара слоев. Считается, что каждый слой взаимодействует только с двумя ближайшими соседями. Для нахождения сдвигового напряжения, действующего в паре слоев, используется упругопластическая функция отклика, подобная использованной нами в работе [9]. Она имеет следующие параметры: упругий и „пластический“ модули, максимальную упругую деформацию и равновесный сдвиг. Параметры функции отклика могут изменяться с учетом предистории деформирования и температуры с помощью специально введенной процедуры.

Материал каждого слоя характеризуется плотностью ρ , удельной теплоемкостью c , теплопроводностью λ , модулем сдвига G , „пластическим“ модулем сдвига G_{pl} и пределом текучести при одноосном растя-

жении Y . Кроме того, каждому слою соответствует смещение x и скорость поступательного движения V , которые находятся интегрированием системы классических уравнений движения для всего набора слоев, записанных в напряжениях (1)–(3) с граничным условием (4),

$$\rho^1 h \frac{dV_n^1}{dt} = \tau_n^{\text{fr}} + \tau_n^{1,2}, \quad (1)$$

$$\rho^i h \frac{dV_n^i}{dt} = \tau_n^{i,i-1} + \tau_n^{i,i+1}, \quad (2)$$

$$\frac{dx_n^i}{dt} = V_n^i, \quad (3)$$

$$\frac{dx_k^i}{dt} = 0, \quad (4)$$

где i — номер слоя ($i = 1, 2, \dots, k - 1$; индекс 1 относится к самому верхнему слою; k — количество слоев); $\tau_n^{\text{fr}} = P \cdot \mu_n$ — сдвиговое напряжение на поверхности, обусловленное силой трения; μ_0 — коэффициент трения на шаге по времени n .

Уравнение (1) записано для верхнего слоя микровыступа. Верхний слой скользит по контртелу, которое движется с постоянной скоростью V_c . Граничное условие (4) — условие жесткого закрепления нижнего слоя на подложке.

В начале расчета свойства пары слоев задаются как средние значения от свойств составляющих ее элементов. Далее в процессе моделирования механические свойства материала пары изменяются в зависимости от температуры.

Для нахождения поля температур в микровыступе решается одномерная тепловая задача в постановке, аналогичной [10]. На результат решения температурной задачи и, следовательно, на поведение системы трения в целом большое влияние оказывает выбор граничных условий. Как правило, при расчете температуры в микровыступе с использованием одномерного приближения, а также при представлении расчетной области в виде тонкого стержня для стороны микровыступа, противоположной контактной поверхности, применяется условие идеальной теплоизоляции. В нашем случае из-за больших времен моделирования и из-за учета циклического характера фрикционного взаимодействия глубина проникновения теплового возмущения превышает высоту микровыступа. Поэтому граничное условие идеальной теплоизоляции для основания микровыступа неприменимо. Одним из способов решения проблемы может быть использование граничного условия в виде

$$T(h_{\text{smp}}, t) = T_{\text{bulk}}(h_{\text{smp}}, t),$$

где $T_{\text{bulk}}(h_{\text{smp}}, t)$ — средняя температура на глубине $z = h_{\text{smp}}$.

$T_{\text{bulk}}(h_{\text{smp}}, t)$ находится из решения задачи фрикционного нагрева образца для большей глубины с большим пространственным шагом сетки, без учета дискретного

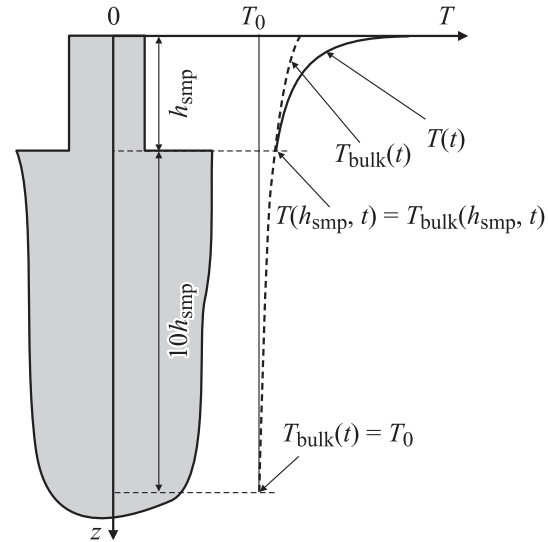


Рис. 2. Схема и граничные условия для решения тепловой задачи.

характера выделения тепла на поверхности при трении. Для расчета данной температуры интенсивность тепловыделения на контактной поверхности определяли величиной не контактного, а номинального давления. Таким образом, температура основания микровыступа „привязывается“ к средней температуре образца на расстоянии h_{smp} от поверхности, которая монотонно возрастает в процессе трения. Схематически это показано на рис. 2. Использование описанного граничного условия сдерживает рост температуры в микровыступе, что в реальности соответствует интенсивному отводу тепла в соседние, ненагретые области материала вблизи пятна касания.

Для расчета упругопластической деформации в модели используется деформационный критерий пластичности. Считается, что материал в паре соседних слоев переходит к упругопластическому деформированию, когда деформация на шаге по времени n превышает величину максимальной упругой деформации для текущей температуры в этой паре, т.е. когда $\gamma_n^{i,i+1} > \gamma_{n, \text{el}}^{i,i+1}(T_n^{i,i+1})$, где $T_n^{i,i+1}$ — температура в паре слоев i и $i + 1$. Величина $\gamma_{n, \text{el}}^{i,i+1}(T_n^{i,i+1})$ зависит от температуры, а также от предыстории деформирования пары слоев.

Перед началом моделирования рассчитывали базовые значения максимальной упругой деформации для каждой пары слоев во всем диапазоне возможных температур $\gamma_{0, \text{el}}^{i,i+1}(T^{i,i+1})$.

Несмотря на то что представленная модель является одномерной, условия пластичности (следуя Тейбору [11]) находили с использованием критерия Мизеса для плоской деформации. Применение данного критерия обосновано тем, что в микровыступе действуют два напряжения: нормальное и сдвиговое. Его использование позволяет учесть вклад нормального напряжения в рамках одномерной постановки задачи. Принимая во вни-

мание сказанное, максимальную упругую деформацию $\gamma_{0\text{el}}^{i,i+1}(T^{i,i+1})$ для заданной температуры определяли из выражения

$$\gamma_{0\text{el}}^{i,i+1}(T^{i,i+1}) = \frac{\sqrt{(Y(T^{i,i+1}))^2 - P_{\text{cont}}^2}}{\sqrt{3} \cdot G^{i,i+1}(T^{i,i+1})}. \quad (5)$$

Значение $\gamma_{0\text{el}}^{i,i+1}(T^{i,i+1})$ используется в функции отклика при расчете динамического поведения системы, если материал в паре слоев еще не испытал пластического сдвига до данного момента времени. Функция отклика устанавливает соотношение между величинами сдвиговой деформации и напряжения для пары слоев и позволяет описывать упругопластическую деформацию как упрочняющегося, так и неупрочняющегося материала. Параметры функции отклика могут изменяться вследствие повышения температуры, а также в результате пластического деформирования материала.

Расчет взаимодействия единичного микровыступа при трении

Микровыступ состоял из 150 слоев толщиной $1\text{ }\mu\text{m}$. Когда моделировали материал с покрытием, то соответствующему количеству верхних слоев микровыступа толщиной h_{coat} придавали свойства, отличные от свойств основного материала. Материал твердого покрытия считался идеально упругим с модулем сдвига, в два раза большим, чем модуль сдвига материала основы. Материал пластичного покрытия имел предел текучести, в два раза меньший, чем основной материал. Другие свойства покрытий были идентичны свойствам материала основы. Свойства материала основы приблизительно соответствовали свойствам аустенитной стали 12Х18Н10Т.

В работе не ставилась цель полностью смоделировать эволюцию какого-либо конкретного материала при трении, но рассматривался модельный материал. Поэтому для простоты предполагалось, что механические свойства уменьшаются линейно с ростом температуры. Считалось также, что при температуре 1300°C , близкой к температуре плавления, величины модуля сдвига, „пластического“ модуля сдвига и предела текучести составляют 10% от их значений при температуре 20°C .

Моделирование единичного акта взаимодействия микровыступа проводили при скорости скольжения контртела $V_c = 1\text{ m/s}$, коэффициенте трения скольжения $\mu = 0.5$, контактном давлении $P_{\text{cont}} = 162\text{ MPa}$, номинальном давлении $P = 7.5\text{ MPa}$ и начальной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Перед началом моделирования образец смещался из начального состояния в равновесное положение, т.е. слои смещались относительно друг друга так, чтобы упругое сдвиговое напряжение уравновесило напряжение, обусловленное силой трения. Это обеспечивало нулевую скорость в начальный момент расчета и отсутствие пластической деформации на границе с жестким

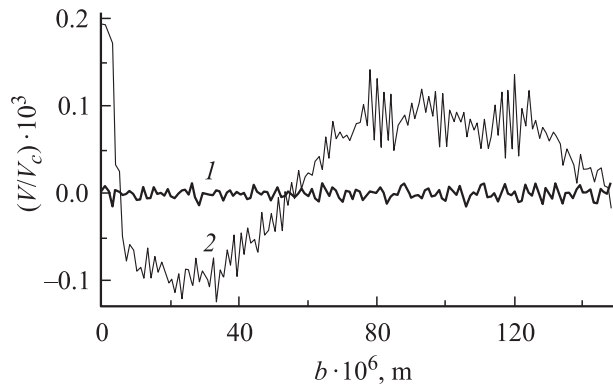


Рис. 3. Отношение скоростей смещения слоев образца V к скорости контртела V_c (b — расстояние до поверхности трения): 1 — до начала пластического деформирования, 2 — при величине пластической деформации на поверхности $\approx 0.06\%$.

основанием во время расчета. Тем самым исключалось влияние условия жесткого закрепления нижней части образца на результаты моделирования.

Время взаимодействия микровыступа с контртелом t_{cont} определяли из соотношения между размером пятна касания L в направлении скольжения и скоростью контртела V_c : $t_{\text{cont}} = L/V_c$. Таким образом, при моделировании размер пятна контакта задается длительностью времени взаимодействия микровыступа с контртелом.

В целом были рассчитаны различные системы: материал без покрытия, материал с твердым покрытием, материал с пластичным упрочняющимся при деформировании покрытием и материал с пластичным неупрочняющимся покрытием.

Моделирование показало, что в начальный момент времени под действием силы трения образец деформируется упруго, дальнейшее скольжение приводит к выделению тепла на поверхности трения и микровыступ нагревается. Это сопровождается снижением упругих свойств (разупрочнением) материала приповерхностного слоя. Однако при малом времени контактирования температура не успевает значительно повыситься, поэтому степень разупрочнения оказывается недостаточной для начала пластической деформации. Кривая 1 на рис. 3 представляет поле скоростей, системы в некоторый момент времени, когда деформация еще остается упругой. Пластическая деформация на данной стадии расчета отсутствует, так как подъем температуры не привел к существенному изменению механических свойств материала. В это время в системе наблюдаются квазипериодические колебания с частотой порядка нескольких мегагерц. Колебания возникают вследствие различий механических свойств поверхностных слоев, обусловленных градиентом температуры. Кроме того, на их характер оказывает влияние начальное смещение образца, уравновешивающее силу трения.

Повышение температуры до некоторой критической величины, когда тангенциальные напряжения, обусловленные трением, достигают предела текучести, вызыва-

ет пластический сдвиг поверхностных слоев. По мере прогрева образца в пластическую деформацию вовлекается все большее количество приповерхностных слоев. Интересен в этом случае динамический отклик системы. Пластическая деформация „запускает“ в системе колебания, частота которых приблизительно на порядок ниже частоты, наблюдавшейся при упругом деформировании (рис. 3, кривая 2). Эти колебания непостоянны, так как пластический сдвиг в поверхностном слое идет не непрерывно, а скачкообразно. Каждый новый акт пластической деформации ведет к зарождению в нижележащем материале упругой волны сдвига, которая распространяется вглубь со скоростью, соответствующей скорости поперечной звуковой волны. Далее образованная упругая сдвиговая волна продолжает непрерывно двигаться по микровыступу, периодически отражаясь от жесткого основания и от поверхности. Интерференция всех инициированных пластическими сдвигами волн дает картину, показанную кривой 2 на рис. 3. Частота наблюдаемых колебаний оказалась приблизительно равной собственной частоте колебаний трибосистемы.

Экспериментально колебания такого типа наблюдаются в виде вибраций узла трения, либо проявляются в форме повторяющихся звуковых сигналов. Изучение акустической эмиссии показывает, что снижение частоты акустического излучения также связано с началом пластической деформации. Следует отметить, что в реальном трибосопряжении частоты подобных колебаний на несколько порядков ниже, чем полученные нами в расчете, так как размеры реальной трибосистемы на несколько порядков больше моделируемой.

Другим проявлением повышения температуры приповерхностных слоев является нелинейная зависимость предела текучести материала от глубины. В расчетах ее можно проследить по величине текущего значения максимальной упругой деформации γ_{el} , которая пропорциональна пределу текучести. На рис. 4 показано, как изменяется отношение текущего значения максимальной

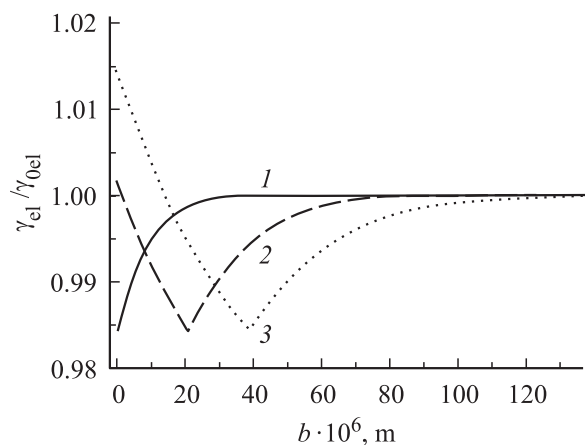


Рис. 4. Отношение текущего значения величины максимальной упругой деформации γ_{el} к ее начальному значению в образце γ_{0el} в различные моменты времени: 1 — $1.6 \cdot 10^{-5}$, 2 — $1 \cdot 10^{-4}$, 3 — $2 \cdot 10^{-4}$ с.

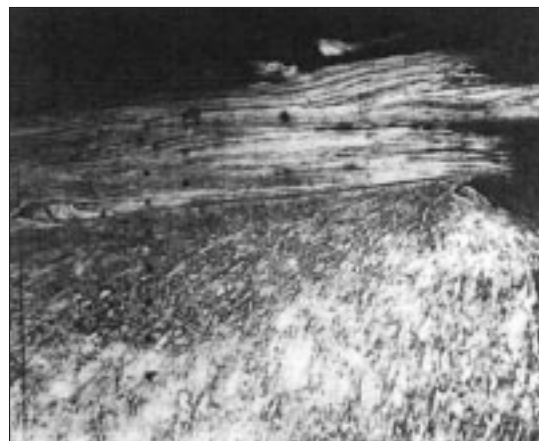


Рис. 5. Сдвиг поверхностных слоев меди при резком увеличении нормальной нагрузки в процессе трения.

упругой деформации к ее начальному значению при удалении от поверхности. Такой характер поведения γ_{el} определяется наклепом материала при пластическом деформировании. С одной стороны, нагретые и пластически недеформированные слои разупрочняются, с другой стороны, имеет место упрочнение вышележащих слоев. Минимальное значение отношения γ_{el}/γ_{0el} определяется упругопластическими свойствами материала и предельной температурой, выше которой сила трения вызывает пластическую деформацию в поверхностных слоях. Для уменьшения времени моделирования начальная температура и нормальное давление задавались такими, чтобы в процессе расчета уже при небольшом повышении температуры начиналась пластическая деформация. Поэтому указанный минимум неглубокий. На рис. 5 показан сдвиг относительно толстого слоя меди на образце-колодке в результате резкого изменения (повышения) нагрузки при трении.¹ Подобный эффект сдвига металла один из авторов наблюдал на тормозной колодке железнодорожного вагона, на которую налипли слои металла, выдавленные с железнодорожного колеса в результате аварийного торможения. Объяснение данному явлению и показанному на рис. 5 вытекает из рис. 4. В режиме стационарного трения скорость смещения слоев в результате пластического течения уменьшается постепенно с глубиной до нуля. Резкое повышение нагрузки на поверхности трения (например, экстренное торможение) вызывает увеличение напряжений в нижележащих слоях и они превышают предел текучести материала, который снижается при нагреве в процессе предварительного трения. В этом случае возможно скачкообразное увеличение скорости перемещения всех приповерхностных слоев, и на некоторой глубине произойдет смещение наиболее разупрочненных слоев относительно основного материала.

¹ Результат получен С.Ю. Тарасовым и представляется с его разрешения.

Моделирование трения в материалах с покрытием

Пластическая деформация, вызванная снижением механических свойств материала, приводит и к разрушению твердых износостойких покрытий. В работе [12] приведены результаты испытаний на трение образцов с покрытиями, полученными ионно-лучевой обработкой азотом. Слои толщиной $3\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$ не обеспечивают существенного возрастания износостойкости поверхности стали в условиях фрикционного контактного взаимодействия без смазки. При испытаниях модифицированный слой разрушался уже на первых метрах пути трения и интенсивность изнашивания достигала уровня, соответствующего неимплантированной стали. Более толстые твердые покрытия характеризуются высокой стойкостью к изнашиванию.

Расчеты, выполненные в рассматриваемой модели, показали, что под твердым слоем развивается пластическая деформация, основной причиной которой является разупрочнение материала основы вследствие фрикционного нагрева. Если время фрикционного взаимодействия в пятне контакта превышает некоторое критическое время, необходимое для разупрочнения материала основы, то в подслое под покрытием имеет место интенсивный пластический сдвиг. Это может привести к разрушению покрытия из-за несовместности деформаций в твердом слое и материале основы. Если толщина покрытия обеспечивает значительное снижение температуры и напряжения в подслое, которые не приводят к пластическому течению материала основы, то покрытие не будет разрушаться. В противном случае пластическая деформация под твердым покрытием будет несовместна с упругим деформированием покрытия, что вызовет растрескивание последнего.

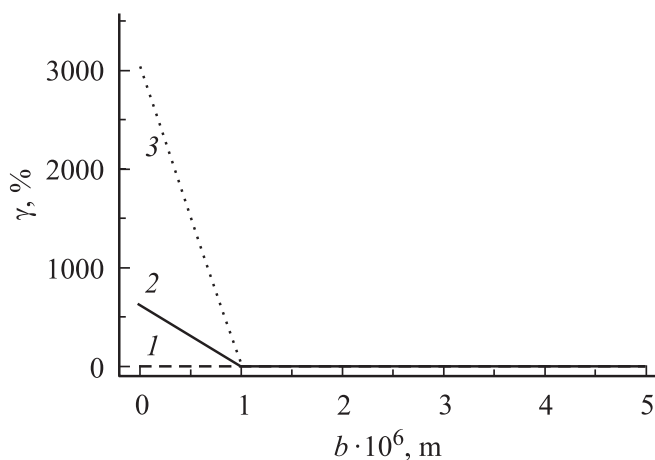


Рис. 6. Зависимость сдвиговой пластической деформации γ от расстояния до поверхности трения b в образце с неупрочняющимся пластическим слоем толщиной $20\text{ }\mu\text{m}$ в различные моменты времени: 1 — $1.6 \cdot 10^{-5}$ с, 2 — $2.5 \cdot 10^{-5}$ с, 3 — $5 \cdot 10^{-5}$ с.

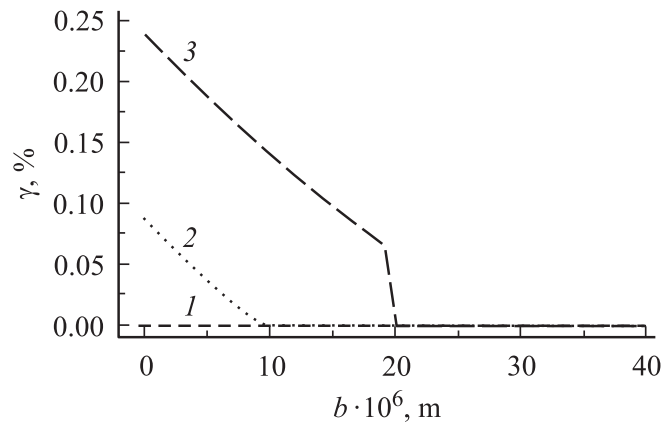


Рис. 7. Зависимость сдвиговой пластической деформации γ от расстояния до поверхности трения b в стальном образце с упрочняющимся пластическим слоем толщиной $20\text{ }\mu\text{m}$ в различные моменты времени: 1 — $1.6 \cdot 10^{-5}$ с, 2 — $5 \cdot 10^{-5}$ с, 3 — $1.5 \cdot 10^{-4}$ с.

Моделирование трения с покрытием из идеально пластичного материала показало, что независимо от толщины покрытия пластический сдвиг имеет место только в самой верхней паре элементов (рис. 6). До начала пластического течения (кривая 1) температура в поверхностном слое возрастает. С повышением температуры материал покрытия разупрочняется и, когда напряжение течения становится меньше сдвигового напряжения, обусловленного силой трения, верхний слой увлекается контртелом и развивается пластический сдвиг. С течением времени его величина достигает очень больших значений (рис. 6, кривые 2 и 3). После начала пластического течения скорость движения верхнего слоя не является постоянной. Она колеблется с некоторой амплитудой около средней величины, составляющей $\approx 70\%$ от скорости контртела. Соответственно и скорость проскальзывания между микровыступом и контртелом значительно меньше ее начальной величины. Вследствие этого мощность тепловыделения на поверхности уменьшается в несколько раз и температура на поверхности снижается. Следует отметить, что пластический сдвиг не прекращается после того, как температура опускается ниже значения, при котором началась пластификация покрытия. Это связано с описанным выше динамическим характером нагружения материала, имеющим место после начала пластического течения. На рис. 7 приведены кривые пластических деформаций в различные моменты времени для упрочняющегося пластического покрытия. Здесь наблюдается картина, аналогичная поведению пластичного материала без покрытия, описанного в предыдущем разделе. Пластическая деформация начинается на поверхности, и с течением времени покрытие пластифицируется по всей толщине. Менее пластичная основа остается упругой. При этом температура в образце монотонно возрастает.

Выводы

1. Сравнение результатов моделирования с экспериментом показывает, что предложенная модель, несмотря на простоту, позволяет корректно описывать поведение градиентных материалов в процессе фрикционного взаимодействия. Она дает представления о характере динамических возбуждений, которые развиваются в результате взаимодействий контактирующих поверхностей в пятнах касания и сопровождаются высокочастотными колебаниями. Из расчетов, выполненных в данной модели, следует, что одной из возможных причин колебаний, проявляющихся в реальных парах трения в виде вибраций и звука, может быть пластический сдвиг поверхностного слоя в пятнах касания.

2. Один из главных результатов данной работы заключается в том, что температурный режим в поверхностном слое является ведущим фактором, определяющим поведение трибосистемы. Изменение параметров системы трения, таких как механические свойства материала, условия нагружения, геометрия контакта, оказывает влияние на пластическую деформацию поверхностного слоя как прямо, так и опосредованно вследствие изменения теплового режима в зоне контактирования. Те же тепловые процессы в значительной степени ответственны за разрушение твердых покрытий, так как в результате разупрочнения материала основы из-за фрикционного нагрева развивается несовместная деформация в твердом слое и материале основы, которая и приводит к разрушению покрытия.

3. Моделирование трения материала с пластичным покрытием показало, что упрочняющиеся и неупрочняющиеся покрытия ведут себя по-разному. В случае упрочняющегося материала пластическая деформация развивается по всей толщине покрытия. В случае неупрочняющегося покрытия пластическая деформация локализуется в тонком поверхностном слое и за время контакта достигает очень больших величин — 1000% и более. После начала интенсивной пластической деформации пластичного слоя температура на поверхности трения существенно падает. Таким образом, пластичный неупрочняющийся слой выступает в качестве твердой смазки и интенсивно снижает фрикционный нагрев.

Работа выполнена по гранту президента РФ поддержки ведущих научных школ „Школа академика В.Е. Панина“ (№ НШ-2324.2003.1) и интеграционному проекту РАН (№ 3.12.4).

Список литературы

- [1] Попов В.Л., Колубаев А.В. // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 6. С. 818–826.
- [2] Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
- [3] Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

- [4] Дерягин Б.В., Пуш В.Э., Толстой Д.М. Теория фрикционных автоколебаний с периодическими остановками. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 143 с.
- [5] Костерин Ю.Н. Механические автоколебания при сухом трении. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 212 с.
- [6] Амосов А.П. // Контактно-гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике. Вып. 2. Куйбышев: КуАИ, 1978. С. 100–106.
- [7] Persson B.N.J., Albohr O., Mancosu F., Peveri V., Smailov V.N., Sivebaek I.M. // Wear. 2003. Vol. 254. P. 835–851.
- [8] Van De Velde F., De Baets P. // Wear. 1998. Vol. 216. P. 15–26.
- [9] Rubtsov V., Kolubaev A. // New Achievements in Tribology. Proc. 6th Intern. Symposium INSYCONT'02. Cracow (Poland), 2002. P. 197–206.
- [10] Рубцов В.Е., Колубаев А.В., Попов В.Л. // Изв. вуз. Физика. 1999. Т. 42. № 9. С. 58–64.
- [11] Лудема К.С. // Трибология: исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. М.: Машиностроение; Нью Йорк: Аллертон пресс, 1993. С. 19–29.
- [12] Белый А.В., Кукареко В.А., Рубцов В.Е., Колубаев А.В. // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 1. С. 51–57.