

УДК 669.539.67:620.22

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф.
Донской государственный технический университет
E-mail: tm.tfdgtu@mail.com

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ТРИБОКОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Выполнено теоретическое исследование функционального взаимодействия свободных электронов с дислокациями поликристаллических материалов, находящихся под внешним деформирующим воздействием, и получена аналитическая формула для определения потенциала трибоконтакта поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов.

Ключевые слова: дислокации, электроны, контактное взаимодействие, поверхностный слой, полосы скольжения, вероятность.

V. I. Butenko

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE POTENTIAL TRIBOCONTACT SURFACES OF IRON-CARBON ALLOYS

A theoretical study is performed of the functional interaction of free electrons with dislocations polycrystalline materials deforming under external impact, and an analytical formula to determine the potential of tribocontact surfaces of iron-carbon alloys.

Keywords: dislocations, electrons, contact interactions, surface layer, slip bands, the probability.

Введение

В работе [1] сформулировано и обосновано положение, согласно которому контактное взаимодействие твёрдых поликристаллических материалов обусловлено процессами движения свободных электронов и дислокаций, приводящими к формированию контактной электродвижущей силы и промежуточного наноструктурного слоя, определяющих поведение материалов в заданных условиях эксплуатации. Экспериментальные исследования показали, что потенциал контактного взаимодействия поликристаллических материалов играет решающую роль в формировании триботехнических характеристик поверхностного слоя контактирующих деталей [2]. Однако в настоящее время отсутствуют аналитические зависимости, использование которых позволило бы прогнозировать величину потенциала трибоконтакта деталей и управлять процессами трения в трибосистемах, решая проблему повышения работоспособности машин и механизмов.

2. Основное содержание и результаты работы.

В общем случае величина потенциала трибоконтакта U поверхностей деталей зависит от элементарного электропотенциала u_3 , создаваемого движущимся свободным электроном, числом электронов n_3 , вступивших во взаимодействие («столкновение») с движущейся дислокацией, и плотностью дислокаций $\rho(y)$, сформировавшейся на глубине y от границы поверхностного слоя контактируемой детали:

$$U = u_3 n_3 \rho(y), \text{ В.} \quad (1)$$

Величина элементарного электропотенциала u_3 , создаваемого свободным электроном, может быть определена по формуле [3]:

$$u_s = \frac{e^2}{r_{1,2}} + \frac{e^2}{r} - e^2 \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{r_{ai}} + \frac{1}{r_{bi}} \right), \text{ В,} \quad (2)$$

где e – заряд электрона; r – расстояние между элементарными частицами (в данном случае, между атомами кристаллической ячейки); $r_{1,2}$ – среднее расстояние между соседними свободными электронами; r_{ai}, r_{bi} – расстояния между свободными электронами и ядрами соседних атомов (ионов) соответственно.

Однако формула (1) определения потенциала трибоконтакта U не отражает сложного взаимодействия между свободными электронами и дислокациями материалов контактирующих поверхностей деталей и может быть использована лишь для сравнительной оценки величины U трибоконтакта разных по структуре и состоянию поликристаллических материалов без учёта вероятного движения дислокаций в процессе контактирования материалов.

Согласно исследованиям, приведённым в работах [4, 5], общее число дислокаций $\rho(y)$, в материале поверхностного слоя детали на глубине y в начале контактного взаимодействия поверхностей деталей и в процессе трибоконтакта за конечный промежуток времени τ может быть определено по числу полос скольжения, выявляемых экспериментально методом декорирования, а интегральную вероятность нахождения их в материале контактируемой поверхности детали на глубине y можно представить через $\alpha(y)$. Тогда общее число полос скольжения, определяющих текущую плотность дислокаций $\rho(\tau_0, \tau)$ на глубине y от границы контактируемой поверхности за промежуток времени $\delta\tau = \tau - \tau_0$, можно задать величиной $N(y)$. Учитывая постоянно зарождающиеся и непрерывно движущиеся в материале контактирующих поверхностей деталей на глубине y дислокации, выраженные через приращение $\delta N(y)$, можно считать, что

$$dN(y) = -\alpha(y)\delta N(y)d(y), \quad (3)$$

где $\delta N(y)d(y)$ – число полос скольжения, достигающих глубины y из общего числа линий $N(y)$, определяемых плотностью дислокаций $\rho(\tau_0, \tau)\delta\tau$.

Решение уравнения (3) имеет вид [4, 5]:

$$\delta N(y) = \rho(\tau_0, \tau)\delta\tau \exp\left(-\int_0^{\Delta H} y dy\right), \quad (4)$$

где ΔH – толщина поверхностного слоя контактирующей детали с изменёнными физико-механическими свойствами.

Для удобства дальнейшего рассмотрения процессов взаимодействия между дислокациями (или полосами скольжения) и свободными электронами в материале поверхностного слоя контактирующих деталей трибосистемы были введены следующие функции:

$$F(y) = \exp\left(-\int_0^{\Delta H} a(y)dy\right); \quad W(y) = -\int_0^{\Delta H} a(y)dy; \quad F(y) = \exp W(y). \quad (5)$$

Тогда запись уравнения (4) упрощается и принимает вид

$$dN(y) = \rho(\tau_0, \tau)\delta\tau F(y). \quad (6)$$

Количество полос скольжения из их общего числа $\rho(\tau_0, \tau)\delta\tau$, которые прекратят своё движение на препятствиях и будут взаимодействовать с движущимися свободными

ми электронами на глубине $(y, y+dy)$ при любом $\tau \geq y/V_0$ (здесь V_0 – скорость распространения деформации в материале поверхностного слоя детали), определится с учётом формулы (3) как

$$\delta\delta N(y) = -d(\delta N(y)) = \rho(\tau_0, \tau)\delta\tau\alpha(y)dy \tag{7}$$

Рассматривая суммарный результат взаимодействия дислокаций и движущихся свободных электронов за конечный промежуток времени τ , необходимо отметить, что за это время будет инициировано $\rho(\tau_0, \tau)\tau$ полос скольжения, в связи с чем необходимо установить, какое количество полос скольжения $dN_1(y)$ из числа $\rho(\tau_0, \tau)\tau$ будет установлено за время τ на глубине $(y, y + dy)$. Очевидно, что на этой глубине будут находиться лишь те из полос скольжения, которые зародились не позднее, чем за время в интервале от $\tau_0 = 0$ до $\tau \geq y/V_0$. Все другие полосы скольжения, которые будут инициированы в процессе трибоконтакта позднее, чем в момент времени $\tau \geq y/V_0$, не успеют к моменту времени τ достигнуть рассматриваемой глубины y при движении их со скоростью V_0 и не повлияют на движение свободных электронов.

Исходя из этих рассуждений, можно написать

$$dN_1(y) = \frac{\tau - y/V_0}{\delta\tau} \delta\delta N(y) \tag{8}$$

откуда с учётом выражения (7) получается

$$dN_1(y) = \rho(\tau_0, \tau)(\tau - y/V_0)\alpha(y)dF(y)dy \tag{9}$$

Кроме того, ещё $dN_2(y)$ полос скольжения может зародиться в интервале времени от $\tau - y/V_0$ до $(\tau - y/V_0) + \delta\tau$ и к конечному моменту времени τ достигнуть глубины $(y, y + dy)$.

Нетрудно доказать, что

$$dN_2(y) = \rho(\tau_0, \tau)\delta\tau F(y) \tag{10}$$

а с учётом соотношения $\delta\tau = dy/V_0$ получается:

$$dN_2(y) = \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} F(y)dy$$

Общее число полос скольжения $N(y)$ на глубине поверхностного слоя контактирующей детали $(y, y + dy)$ в момент времени τ составит

$$dN(y) = dN_1(y) + dN_2(y) = \rho(\tau_0, \tau)(\tau - y/V_0)\alpha(y)F(y)dy + \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} F(y)dy,$$

откуда после интегрирования и последующего преобразования получается:

$$N(y) = \rho(\tau_0, \tau) \int_y^{\Delta H} (\tau - y/V_0)\alpha(y)F(y)dy + \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} \int_y^{\Delta H} F(y)dy \tag{11}$$

Если учесть, что $dF(y)/dy = -\alpha(y)F(y)$, и воспользоваться интегрированием выражения (11) по частям [4], то выражение для определения величины $N(y)$ примет вид

$$N(y) = \rho(\tau_0, \tau)\tau \int_y^{\Delta H} \alpha(e)F(y)dy - \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} \int_y^{\Delta H} y\alpha(y)F(y)dy + \\ + \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} \int_y^{\Delta H} F(y)dy = \rho(\tau_0, \tau)\tau \int_y^{\Delta H} dF(y)dy - \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} \int_y^{\Delta H} ydF(y)dy + \frac{\rho(\tau_0, \tau)}{V_0} \int_y^{\Delta H} F(y)dy,$$

или после соответствующих преобразований при $0 \leq y \leq V_0\tau$ общее число полос скольжения на глубине y поверхностного слоя контактируемой детали определится по формуле

$$N(y) = \rho(\tau_0, \tau)(\tau - y/V_0)F(y) \tag{12}$$

Если принять, что плотность поверхностных источников дислокаций, из которых берут своё начало полосы скольжения, пропорциональна времени контактного взаимодействия деталей трибосистемы τ , а характер движения электронов за это время не меняется, то можно считать, что $N_0 = \rho(\tau_0, \tau)$ и в окончательном виде полное число полос скольжения $N(y)$ на глубине y поверхностного слоя составит

$$N(y) = N_0(1 - y/\Delta H)F(y) \tag{13}$$

Считая, что плотность дислокаций внутри полосы скольжения постоянна и содержит в основном диполи краевых дислокаций, а доля винтовых дислокаций в процессах деформирования поликристаллических материалов незначительна и её можно пренебречь, можно для оценки плотности дислокаций на глубине y от раздела контактного поверхностного слоя $\rho(y)$ воспользоваться следующим соотношением для определения дислокаций на единице длины полосы скольжения [4, 5]:

$$\rho(y) = N(y) \frac{\pi(1 - \mu)p(y)}{Gb_k} \tag{14}$$

где $p(y)$ – текущее контактное давление в материале поверхностного слоя на глубине y ; G – модуль сдвига материала поверхностного слоя детали трибосистемы; b_k – вектор Бюргерса.

Учитывая зависимости (13) и (14) и принимая исходную плотность дислокаций недеформированного материала поверхностного слоя детали равной $\rho_{исх}$, можно написать

$$\rho(y) = \rho_{исх} \left(\frac{\pi(1 - \mu)p(y)}{Gb_k} (\tau - y/V_0)F(y) + 1 \right) \tag{15}$$

В формуле (15) неизвестной величиной является функция $F(y)$, связанная с вероятностью торможения дислокаций на препятствиях их движению и взаимодействием с движущимися свободными электронами. Как показано в работе [6], взаимодействие двигающейся дислокации с препятствием обычно носит характер близкодействия и ин-

тегральную вероятность торможения дислокационной линии $W(y)$ можно задать соотношением

$$W(y) = W_1(1 - W_2)W_3 \tag{16}$$

где W_1 – вероятность остановки дислокации у препятствия в плоскости скольжения; W_2 – вероятность, связанная с преодолением дислокацией препятствия путём термической активации; W_3 – вероятность, обусловленная неопределённостью взаимодействия движущейся дислокации с потоком свободных электронов.

В работе [5] приведены следующие формулы для определения вероятностей W_1 , W_2 , W_3 :

$$W_1 = \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{l_{эф}}\right)\right) y^{\frac{2K}{l_{эф}}}; \quad W_2 = W_0 \exp\left(-\frac{U_0 - U(y)}{K_0 \Theta(y)}\right); \quad W_3 = \frac{p(y)\mu_0\omega^2}{2 \exp \gamma \mathcal{G}_e}, \tag{17}$$

где $R = D/2$; здесь D – размер препятствия движению дислокации; $l_{эф}$ – среднее эффективное расстояние между препятствиями; K – коэффициент, зависящий от модулей упругости и сдвига, характера распределения смещений формы дифракционных линий и величины кристалла; W_0 – постоянная величина, связанная с частотным множителем; U_0 – высота обусловленного контактным взаимодействием активационного барьера; $U(y)$ – работа приложенного контактного давления поверхностей деталей трибосистемы $p(y)$; K_0 – постоянная Больцмана; $\Theta(y)$ – температура в точке материала поверхностного слоя детали, находящейся на расстоянии y от границы; μ_0 – постоянная часть химического потенциала носителя тока (электрона); ω – частота нормальных колебаний в кристаллической решётке; γ – плотность материала поверхностного слоя детали; \mathcal{G}_e – скорость носителей тока (электронов) в материале детали.

Если в выражение (1) подставить соотношения (2), (15), (16), (17) с учётом вероятности взаимодействия свободных электронов с движущимися дислокациями, предполагая, что оно носит характер близкого действия, то получится следующая обобщённая формула определения потенциала трибоконтакта U :

$$U = \left[\frac{e^2}{r_{1,2}} + \frac{e^2}{r} - e^2 \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{r_{ai}} + \frac{1}{r_{bi}} \right) \right] \rho_{ucx} \times \left(\frac{\pi(1-\mu)p(y)}{Gb_k} (r - y/V_d) \exp \left(1 - \exp \left(-\frac{R^2}{l_{эф}} \right) y^{\frac{2R}{l_{эф}}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - W_0 \exp \left(-\frac{U_0 - U(y)}{K_0 \Theta(y)} \right) \frac{p(y)\mu_0\omega^2}{2 \exp(\gamma \mathcal{G}_e)} + 1 \right) \right], \text{ В} \tag{18}$$

В формуле (18) определения потенциала трибоконтакта поликристаллических материалов U значения величин e , r , $r_{1,2}$, r_{ai} , r_{bi} , R , μ , G , b_k , $l_{эф}$, K , W_0 , U_0 , K_0 , μ_0 , ω , γ , \mathcal{G}_e либо известны, либо могут быть экспериментально установлены. Вводя функции $F_1 = f_1(K\rho, \Delta H, D_{cp})$, $F_2 = f_2(p \times V_{ck})$ и $F_3 = f_3(\Theta(y))$ при $0 \leq y \leq \Delta H$, величину U можно представить зависимостью

$$U = 10^{-3} F_1 \times F_2^{1,2} \times F_3^{0,9} \times K_F, \text{ мВ}, \tag{19}$$

где K_F – коэффициент, зависящий от химического состава и состояния материала поверхностного слоя контактируемых деталей: $K_F = 1,0$ – при одинаковом химическом составе и термически необработанном состоянии поверхностного слоя контактируемых деталей из железоуглеродистых сплавов; $K_F = 1,15$ – при одинаковом химическом составе и одной термически обработанной (закалённой, улучшенной или нормализованной) поверхности контактируемых деталей; $K_F = 1,10$ – при различном химическом составе и термически необработанном состоянии поверхностного слоя контактируемых деталей из железоуглеродистых сплавов; $K_F = 1,25$ – при различном химическом составе и термически обработанной (закалённой, нормализованной или улучшенной) поверхности контактируемых деталей.

Для определения функций F_1, F_2, F_3 составлена номограмма (рис. 1), на которой стрелками показана последовательность нахождения их значений по заданным величинам параметров качества поверхностного слоя контактируемой детали и режимам трения: $K_p, \Delta H, p, V_{ск}$ и Θ .

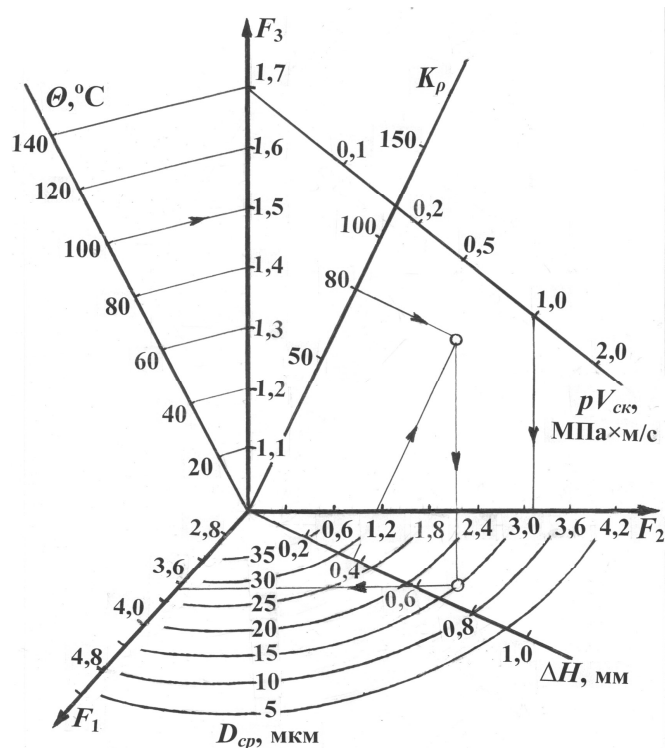


Рисунок 1. Номограмма для определения значений функций F_1, F_2, F_3 при вычислении потенциала трибоконтакта U

В табл. 1 приведены сравнительные значения потенциала U , полученные расчётом и экспериментально на установке для определения электродвижущей силы контактного взаимодействия материалов, описанной в работе [7], с использованием образцов с различным состоянием материала поверхностного слоя. Из анализа табл. 1 видно, что отклонения расчётных значений потенциала трибоконтакта U , полученных подстановкой соответствующих величин F_1, F_2, F_3 в формулу (19), от экспериментальных не превышают 12 %.

Таблица 1

Расчётные и экспериментальные значения потенциала трибоконтакта U для различных пар и режимов трения

Пара трения	Состояние по- верхностного слоя			Режимы трения			Значение потен- циала трибоконт- такта U , мВ		От- кло- не- ние, %
	Кр	ΔH , мм	Дср, мкм	p , МПа	$V_{ск}$, м/с	Θ , град. С	Расчёт- ное	Экспе- римен- тальное	
Сталь 12Х3Н- сталь 12Х3Н	80	0,4	10	0,5	0,3	100	11,31	12,5	11,4
	100	0,3	15	1,0	0,5	80	13,53	15,0	10,0
Сталь 30ХГСА-сталь 30ХГСА	90	0,3	20	1,2	0,5	100	14,76	15,5	5,0
	110	0,4	10	1,5	0,6	60	19,17	21,0	9,5
Сплав ЖС6У- сплав ЖС6У	90	0,5	10	2,0	0,5	100	23,86	21,5	9,0
	110	0,6	15	1,5	0,6	120	20,64	19,0	7,9

3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили получить аналитические зависимости потенциала трибоконтакта поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов, практическое использование которых позволяет прогнозировать работоспособность трибосистем и определять эффективные материаловедческие, технологические и эксплуатационные пути повышения надёжности машин и механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенко, В. И. Контактное взаимодействие материалов при трении и резании / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 245 с.
2. Бутенко, В. И. Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с.
3. Огибалов, П. М. Механика полимеров / П. М. Огибалов, В. А. Ломакин, Б. П. Кишкин. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 528 с.
4. Бутенко, В. И. Электронно-дислокационные представления о процессах резания металлов и сплавов / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 211 с.
5. Бутенко, В. И. Электронно-дислокационная теория контактного взаимодействия поверхностей твёрдых тел / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во Технологического ин-та ЮФУ, 2007. – 208 с.
6. Бутенко, В. И. Физико-технологические основы формирования управляемых структур сталей и сплавов / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 264 с.
7. Бутенко, В. И. Научные основы нанотрибологии / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.

Поступила в редколлегию 6.03.2018 г.