



Межатомные взаимодействия на поверхностях металлополимерного трибосопряжения



Игорь КОЛЕСНИКОВ

Igor V. KOLESNIKOV

Interatomic Interactions on the Surface of Metal-Polymer Tribocoupling

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p.23)

На основе изучения тепловых и электрических полей в металлополимерной трибосистеме установлены критерии износа: для антифрикционных материалов – образование пленки переноса, а для фрикционных – снижение степени наводороживания металлического контртела. Отмечено, что максимум концентрации водорода совпадает с максимумом температуры.

Представлены результаты исследования сегрегационных явлений легирующих и примесных элементов в трибосистеме колесо-тормозная колодка. Методом оже-электронной спектроскопии проведен анализ элементного состава на границах зерен стали железнодорожного колеса. Согласно полученным данным, верхние слои металла дефектов колеса кроме железа содержат серу, фосфор и цинк. В рабочем слое бандажа серы и фосфора значительно меньше на уровне их объемного содержания.

Ключевые слова: железная дорога, система колесо-тормозная колодка, трибологическое сопряжение, металлополимеры, межатомное взаимодействие, пленка, диффузия, контактная термоупругая задача, температура, сегрегация, электризация.

Колесников Игорь Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий научной лабораторией «Нанотехнологии и новые материалы» научно-испытательного центра «Нанотехнологии и трибосистемы» Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.

Трибология, зародившаяся как наука о процессах в макроскопических объектах, сегодня благодаря успехам квантовой химии и развитию экспериментальной физики рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии (РЭС и ОЭС) должна выходить на микро- и наноуровни. Если говорить предметно, то нужно более детально заниматься изучением межатомных взаимодействий на поверхности трения как антифрикционных, так и фрикционных сопряжений.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

Одним из первых объектов, который исследовался с помощью метода рентгеноэлектронной спектроскопии, был композит на основе нетканого материала из волокон политетрафторэтилена (ПТФЭ), где в качестве связующего использован фенолформальдегид [1–3].

В результате получен ряд зависимостей интенсивностей различных рентгеноэлектронных линий элементов, обнаруженных в пленке фрикционного переноса, от времени и нагрузки фрикционного взаимодействия. Анализ этих зависимостей позволил достаточно полно

представить процессы трения с участием фторопласта и выделить три этапа формирования пленки переноса в исследуемое время.

Первый этап охватывает промежуток от 10 до 60 с, когда поверхностный слой пленки формируется в основном за счет продуктов фрикционного переноса связующего. Второй этап приходится на интервал от 1 мин до 0,5 часа: на поверхности контртела происходит увеличение содержания продуктов фрикционного переноса ПТФЭ с одновременным уменьшением содержания продуктов переноса связующего. Третий этап занимает от 0,5 до 1 часа. Интенсивность рентгеноэлектронных линий $F1_s$ и Cl_s , характеризующих количество продуктов фрикционного переноса ПТФЭ в пленке, уменьшается, а линий Cl_s и $O1_s$, относящихся к элементам связующего, увеличивается.

По ходу фрикционного переноса состав поверхностного слоя пленки в исследуемый интервал времени меняется трижды, причем на каждое следующее изменение требуется больший временной отрезок. Процесс формирования пленки, в течение которого происходят немономонные изменения ее состава, длится не более двух часов и зависит от режимов трения.

Для раскрытия механизма образования пленки фрикционного переноса дополнительно были проведены исследования трибоэлектризации металлополимерного контакта исходя из концепции поверхностных состояний (ПС), представляющих собой энергетические уровни на поверхности и являющиеся центрами локализации свободных носителей заряда. Изучение композита на основе нетканого материала из волокон политетрафторэтилена и связующего фенолформальдегида показали, что компонента ПТФЭ при трении о сталь имеет положительную трибозарядку, а связующее — отрицательную.

Это означает, что вначале при трении на поверхности металлического контртела образуются и достаточно прочно удерживаются продукты износа связующего, имеющего положительную трибозарядку. После образования так называемого первого слоя из связующего продукты износа ПТФЭ за счет своей разнополярности с ним сохраняются на поверхности с помощью электри-

ческих сил. Затем формируется тонкая высокоориентированная пленка переноса, которая и обеспечивает малый коэффициент трения. При увеличении скорости скольжения происходит разогрев трибоконтакта и соответственно снижение трибоЭДС. Одновременно с этим уменьшаются электростатические силы, удерживающие продукты износа ПТФЭ на связующем, и наступает интенсивный износ.

Аналогичные результаты получены и для композитов с использованием полиэтилена (ПЭ) и поликапроамида (ПКА), ПКА+ПТФЭ, ПКА+ПЭ, где снижение коэффициента трения и увеличение износостойкости при повышенных нагрузках обусловлено образованием на поверхности металла сначала первого слоя из ПКА, а затем уже тонкой высокоориентированной с малым сдвиговым сопротивлением пленки из ПЭ и ПТФЭ.

На основании результатов исследований установлено, что роль связующего сводится не только к объединению композита в единое целое и обеспечению способности воспринимать внешнюю нагрузку, но и к активному участию в процессе формирования пленки фрикционного переноса.

Таким образом, для антифрикционных композиционных полимерных материалов главным критерием получения минимального коэффициента трения и высокой износостойкости следует считать возможность образовывать на трущейся поверхности двухслойную пленку переноса.

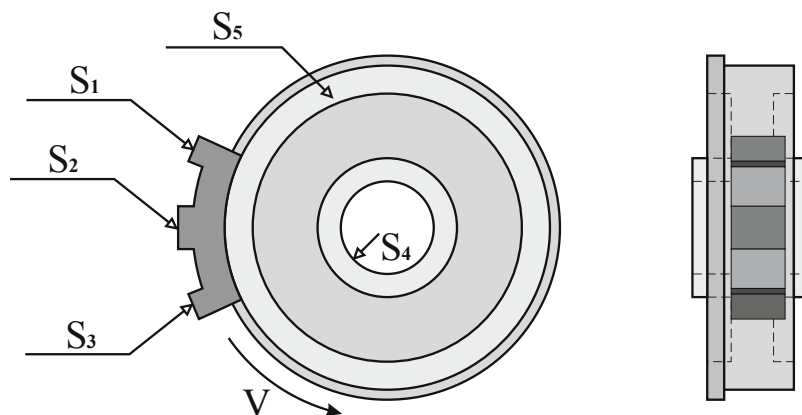
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКОВОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

При рассмотрении фрикционных узлов трения, например, колеса и композиционной колодки тормозной системы подвижного состава, огромную роль играют диффузионные и сегрегационные процессы с учетом их функциональной зависимости от температуры.

Известно, что специфика полимерных материалов заключается в том, что их работа в трибосистемах сопровождается большим нагревом, а также процессами деструкции с образованием химически активных продуктов, в том числе и водорода, с последующей диффузией внутрь металлического контртела.



Рис. 1.
Схематичное
изображение
исследуемой
системы.



$$(\lambda^{(i)} + 2\mu^{(i)})\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}^{(i)} - (\lambda^{(i)} + \mu^{(i)})\nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(i)} - \gamma^{(i)}\nabla \theta^{(i)} - \rho^{(i)}\ddot{\mathbf{u}}^{(i)} = 0,$$

$$\Lambda^{(i)}\nabla \cdot \nabla \theta^{(i)} - C_\varepsilon^{(i)}\dot{\theta}^{(i)} - T_0\gamma^{(i)}\frac{\partial}{\partial t}\nabla \cdot \mathbf{u}^{(i)} = 0, i=1,2;$$

(1)

$$\begin{cases} u_R^{(1)} = u_Z^{(1)} = 0, \mathbf{x} \in S_4, \\ u_Y^{(2)} = u_Z^{(2)} = 0, \mathbf{x} \in S_1 \cup S_2 \cup S_3, \\ \frac{1}{\|S_1\| + \|S_2\| + \|S_3\|} \int_{S_1 \cup S_2 \cup S_3} \sigma_{RR}^{(2)} dS = P. \end{cases} \begin{cases} \tau_{R\phi} = k \cdot \sigma_{RR}, \mathbf{x} \in S_{\text{конт}}, \\ q^{(2)} = a(\theta_{\text{среды}} - \theta^{(1)}), \mathbf{x} \in S_5, \\ q_{\text{конт}} = k_{\text{конт}}(\theta^{(1)} - \theta^{(2)}), \mathbf{x} \in S_{\text{конт}}, \\ q_{\text{конт}}^{(1)\text{ген}} = k_{\text{эн}} k_p E_{\text{тр}}, \mathbf{x} \in S_{\text{конт}}, \\ q_{\text{конт}}^{(2)\text{ген}} = k_{\text{эн}} (1 - k_p) E_{\text{тр}}, \mathbf{x} \in S_{\text{конт}}, \\ \theta^{(1)} = \theta^{(2)} = 0, t = 0, \\ \dot{u}_\phi^{(1)} = V(t), t \in [0, T]. \end{cases} \quad (2)$$

Сначала определим значение температуры путем решения термоупругой задачи, касающейся системы колесо-тормозная колодка. Схематичное изображение исследуемой системы представлено на рис. 1.

Колесо вращается против часовой стрелки со скоростью V на временном промежутке $t \in [0, T]$, тормозная колодка прижимается к колесу с силой P . На свободной поверхности колеса S_5 задано условие конвективного теплообмена со средой с коэффициентом a . В области контакта предполагается трение с использованием коэффициента k .

В дополнение к декартовой системе координат с началом в центре тормозного диска будем иметь в виду цилиндрическую систему (R, ϕ, Z) относительно того же центра (ось Z перпендикулярна плоскости колеса).

Описание движения осуществляется аналогичными уравнениями связанной термоупругости (1) и граничными условиями (2). Верхний индекс (1) соответствует колесу, (2) — колодке (1, 2).

Покажем более детально каждое из граничных условий (2). На поверхности S_4 задано ограничение на перемещение железнодорожного колеса в направлении R и z , что дает возможность совершать колесу только вращательные перемещения. Аналогично на поверхностях S_1, S_2, S_3 существует ограничение на перемещение по направлениям Y и Z , определяющее движение тормозной подошвы только по горизонтали. Силовые условия задачи заключаются в задании распределенной нагрузки на поверхностях S_1, S_2, S_3 , что демонстрирует прижимающее усилие тормозной системы величиной P . В области контакта касательные напряжения $\tau_{R\phi}$ пропорциональны нормальным σ_{RR} с коэффициентом трения k .

Важным фактором при описании температурного поведения тормозных систем является конвективный теплообмен со средой, что связано с обдувом конструкции воздухом. Условием конвекции в представленной задаче выступает при этом пропор-

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ & [C'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^u] \\ & [K'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (3),$$

циональность величины теплового потока $q^{(2)}$ на внешней поверхности колеса S_5 и разности температур колеса $\theta^{(1)}$ и окружающей среды $\theta_{\text{среды}}$ с коэффициентом a .

Необходимый момент — учет теплопроводности в зоне контакта. В описываемой ситуации такое условие носит обязательный характер при моделировании перехода тепла от одного тела к другому и выражается в пропорциональности теплового потока в контактной паре $q_{\text{конт}}$ разности температур контактных поверхностей $\theta^{(1)}$, $\theta^{(2)}$ (во внимание принимается коэффициент контактной теплопроводности $k_{\text{конт}}$). Процесс генерации тепла за счет трения идентичен появлению дополнительных потоков тепла на границах контактирующих тел с интенсивностями, пропорциональными коэффициенту $k_{\text{эн}}$ и величине энергии $E_{\text{тр}}$, перешедшей из трения в тепло, а также весовому коэффициенту k_p , обозначающему распределение тепла между двумя поверхностями.

Поскольку рассматриваемая задача является нестационарной, то необходимо иметь соответствующие начальные условия, с которыми связаны начальная температура тел $\theta^{(1)}$, $\theta^{(2)}$, равная нулю в нашем случае, и начальная скорость вращения колеса $\dot{\varphi}^{(1)} = V(0)$.

В качестве материала для всех компонентов была выбрана сталь с параметрами: модуль Юнга $E=2,0e^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона $\nu=0,3$; плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\Lambda=48 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; теплоемкость $C_\varepsilon = 452 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент температурного расширения $\gamma=1,1e^{-5} \text{ 1/К}$.

Сложность геометрии и связанное термоупругое поведение системы не позволяют получить решение аналитически. В таких случаях эффективным методом решения, как показано, является использование конечно-элементных пакетов [4], в частности ABAQUS. При конечно-элементном разбиении тел был взят восьмиузловой элемент C3D8T, допускающий при моделировании учет как упругих, так и температурных полей, конечно-элементные матричные уравнения которого имеют вид

(3), где M — матрица масс; C — матрица демпфирования; K — матрица жесткости; u — вектор смещений; F — сумма узловых усилий и давлений на элементах; C' — удельная теплоемкость; K' — матрица диффузионной проводимости; T — вектор температур; K^u — матрица термоупругой жесткости.

Конечно-элементный анализ для более правильной сходимости был разделен на два этапа. В рамках первого решалась статическая задача о вдавливании с силой P тормозных накладок в диск. На следующем этапе — динамическая нестационарная задача, в рамках которой задавалась скорость вращения тормозного диска. В результате установлено, что максимум температур по толщине диска в сечениях в удалении от зоны контакта находится не на поверхности, а в глубине. В реальности глубина такого эффекта приблизительно 200–500 мкм.

ДИФфуЗИОННЫЕ И СЕГРЕГАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Известно, что в ходе термомеханической деструкции полимеров при трении в зоне контактирования с металлом выделяются различные по своей природе твердые, жидкие и газообразные продукты износа, среди которых большое количество водорода. Он адсорбируется и активно поглощается контактирующей поверхностью металла.

Присутствие водорода в железе, стали радикально изменяет их свойства — понижает пластичность, увеличивает хрупкость, твердость, физические свойства и в итоге приводит к намазыванию металла на полимер.

Для определения влияния температурного градиента на профиль концентрации водорода в металлическом контртеле была разработана методика и изготовлена установка, позволяющая менять температурное поле по толщине металлического тела, изготовленного в виде наборных плотно прилегающих пластин.

Уровень газосодержания стальных образцов определяется в процессе выделения газа из металла при его нагревании





и дальнейшим хроматографированием, а также методом анодного растворения. Уточнено, что максимум концентрации водорода совпадает с максимумом температуры.

Современная трибология накопила огромный объем информации о природе трения и механизмах изнашивания материалов. Однако следует признать, что роль, которую здесь играют примесные и легирующие элементы в поликристаллических материалах, до сих пор недооценивается. Речь идет в первую очередь о явлении зернограницной сегрегации, в результате которой атомы таких элементов выходят на границы зерен, и последствиях этого явления. Применительно к железнодорожному транспорту подобная проблема ранее только обозначалась. Сегодня отсутствуют прямые экспериментальные данные, позволяющие оценить влияние сегрегационных процессов на износ и дефектообразование рабочих поверхностей колеса и рельса по мере эксплуатации.

Оже-электронная спектроскопия является методом, который позволяет напрямую изучать особенности зернограницной сегрегации. С помощью ОЭС в [4, 5] был определен элементный состав на границах зерен стали железнодорожного колеса, выведенного из эксплуатации по причине многочисленных типичных дефектов его рабочей поверхности (сколы в основном отмечались по межзеренным границам). Образцы вырезались из дефектных мест поверхности (выщербины и т. п.), уже отделившихся фрагментов, участков колеса на разных глубинах. Дополнительно изучался объемный состав и параметры кристаллической решетки в материале колеса, проводились металлографические исследования и оценивались глубинные профили микротвердости.

Было установлено, что на поверхностях дефектных участков и сколах присутствуют атомы: Fe (матрица), легирующих элементов (C, Cu, Mn, Cr, Si), примесей (P, S), а также Ba, Zn, Ca, K. Причины их появления на поверхности катания колеса различны. Атомы бария и цинка содержатся в наполнителях полимерной композитной тормозной колодки, основу которой составляет углеводородное связующее. Атомы калия и кальция относятся

к элементам окружающей среды. Кремний входит в состав материала колеса и присутствует в окружающей среде.

Наиболее важный результат измерений состоит в том, что на границах зерен, расположенных на сколах, происходит сегрегация атомов легирующих и примесных элементов. Концентрация элементов в исследуемых слоях превышает их объемное содержание в десятки раз. На поверхностях выщербин превышение существенно больше (например, для S — до 120 раз). Учитывая этот экспериментальный факт, а также то, что примеси P и S и атомы Cu, Zn, Sr, Ca, K, находясь на границах зерен в матрице железа, разупрочняют связь между зернами [6], есть основание утверждать, что сегрегация элементов внесла свой вклад в разрушение рабочей поверхности колеса. Содержание углерода во всех исследованных случаях велико и несущественно изменяется от образца к образцу. Подобная сегрегация может быть обусловлена контактом с полимерным материалом тормозной колодки и является следствием загрязнения поверхности, поскольку речь идет о реальных, а не модельных образцах. То же относится и к концентрации кислорода.

Заметим, кроме того, что марганец, никель и кремний на границах зерен не наблюдаются. В то же время Mn и Si в значительном количестве имеются на сколах пластины массопереноса (продукта катастрофического изнашивания колеса), состоящей в основном из твердого материала колеса, «намазываемого» в процессе контакта колеса с колодкой на поверхность ее сравнительно мягкого полимера.

Избыточное (по сравнению с объемным) содержание меди на границах зерен и поверхностях разрушения может иметь своим происхождением не только объем колеса, но и материал колодки (латунь). Поэтому анализируемые данные свидетельствуют об интенсивных обменных диффузионных процессах с участием атомов стали колеса, материала тормозной колодки и окружающей среды. То есть трибосистема в процессе эксплуатации не является замкнутой по атомарному составу.

МЕТОДЫ КВАНТОВОЙ ХИМИИ

Известно, что атомы фосфора Р и серы S охрупчивают металлы. В [7] с помощью простых оценок показано, что атомы охрупчивающих элементов способны ослаблять связь между зернами. При этом речь шла только об энтальпии сублимации и размерах атомов веществ. В силу допущений, положенных в основу теоретических расчетов, выводы из [7] нуждаются в экспериментальном подтверждении и (или) дополнительном исследовании.

Появившиеся в последние два десятилетия методы квантово-химических расчетов, приближенные к теории функционала плотности (DFT), позволяют провести более точный, чем в [7], анализ взаимодействий, влияющих на разрушение металлов. Эти методы дают возможность изучать соединения переходных металлов, включающие сотни атомов. Они касаются явлений с разной мерой химического взаимодействия: адсорбции молекул на поверхности твердых тел, гомогенного и гетерогенного катализа, биохимии и др. Однако работы, в которых методы квантовой химии были бы приближены к проблеме разрушения и износостойкости металлов, все еще редки и в них рассматриваются узкоспецифические вопросы.

В наших расчетах [8], относящихся к проблеме сегрегации, использовался пакет программ ADF [9], приближенный к теории функционала плотности. Вначале оценивался размер многоатомного кластера, с помощью которого исследуемые эффекты могут быть воспроизведены на качественном и, возможно, полуколичественном уровне. Модельный кластер должен, очевидно, содержать некоторое количество атомов матрицы (из прилегающих слоев двух соседних зерен), а также сегрегированных атомов, расположенных на границе. На основе расчетов, в которых определялись оптимальная геометрия кластеров и энергия связи, приходящаяся на один атом, было установлено, что кластер с количеством атомов $n \approx 18$ можно квалифицировать как минимальный, позволяющий исследовать явления, сопутствующие изменениям химического состава стали.

Для моделирования условий, при которых происходит сегрегация, использовался тот факт, что на наиболее узком участке границы между зернами в поликристалле (месте контакта зерен) ширина ее примерно равна вели-

чине постоянной решетки [10]. Это дает возможность взять в расчет простую модель границы: в 18-атомном кластере железа $\text{Fe}_2\text{Fe}_6\text{X}_2\text{Fe}_2\text{Fe}_6$, состоящем из пяти слоев, атомы из среднего слоя заменены сегрегированными, обозначенными символом X. Причем два верхних и два нижних слоя имитируют соответствующие зерна поликристалла, а средний слой представляет собой границу между зернами.

Нами проведены расчеты энергии связи кластеров, которые содержат адсорбированные и сегрегированные атомы химических элементов первых четырех периодов таблицы Д. И. Менделеева, с порядковыми номерами от 1 до 36 (от водорода до криптона). На базе полученных данных вычислены значения энергии Ер, необходимой для разрыва кластеров с образованием двух частей, имитирующих зерна в модели.

Из расчетов следует, что атомы бора, углерода, марганца прочно «сшивают» зерна железа, поскольку энергия, требуемая для разрыва кластеров, содержащих эти атомы, оказывается больше, чем соответствующая энергия для кластера того же размера из чистого железа. Наоборот, атомы лития, кремния, фосфора, серы, меди и никеля, хотя и вступают в химическую связь с железом, ослабляют связь между зернами, ибо энергия для разрыва кластеров с этими элементами меньше, чем при наличии кластера из чистого железа. Очевидно: ослабление связи между зернами в поверхностном слое уменьшает износостойкость стали.

Если расчетные результаты применять на практике (например, решать задачу повышения износостойкости стали путем введения в ее поверхностные слои атомов упрочняющих элементов), то необходимо учитывать свойство растворимости элементов. В объемной фазе железа (т. е. в зернах) та их часть, которая остается на поверхности зерен, может оказаться слишком малой и недостаточной для создания эффекта упрочнения. С этой точки зрения наиболее продуктивным представляется введение в сталь бора, который хотя и уступает углероду по значению величины Ер, однако значительно меньше его растворим в поверхностном слое металла.

Стоит ввести в сталь бор в количестве, обеспечивающем заполнение междолинных границ (фактически это сотые доли процента от общего объема образца), и мож-





но ожидать существенного повышения износостойкости стали. Если же количество бора далее увеличивать, часть его атомов будет проникать в зерна железа и внутри них возникнут химические соединения бора с железом, углеродом и другими металлами — бориды и карбиды. Такие соединения заметно уступают в прочности железу, и свойства стали станут ухудшаться. Таким образом, улучшать прочность и износостойкость стали следует только с помощью малых концентраций бора.

ВЫВОДЫ

1. С учетом установленных закономерностей влияния температуры и температурного градиента на трибомеханические, трибозлектрические и трибохимические процессы в контакте полимер—металл сформулированы обобщенные рекомендации по выбору наполнителей и армирующих материалов:

— для антифрикционных композиционных полимерных материалов главным критерием минимизации коэффициента трения и высокой износостойкости надо считать способность спонтанно образовывать на поверхности трения двухслойную пленку, сочетающую смазочные свойства и высокую адгезию за счет разнополярной трибозарядки ее композитов;

— для фрикционных материалов основным критерием исключения повышенного износа и переноса металла на сопряженную пластмассовую поверхность является снижение степени наводороживания металлического контртела путем создания на нем оптимального температурного градиента и положительной трибозарядки.

2. Решение нестационарной связанной термоупругой задачи тормозной диск-накладка показало, что максимум температуры по толщине диска находится не на поверхности, а в глубине. Экспериментально установлено, что максимум концентрации водорода в диске совпадает с максимумом температуры.

3. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения методов РЭС, ОЭС и квантовой химии при решении трибологических задач. Изучен-

ные обменно-диффузионные процессы между колесом и колодкой и сегрегационные процессы внутри металла колеса целесообразно учитывать при разработке мероприятий по повышению износостойкости системы колесо-рельс-тормозная колодка.

4. Энергия связи атомов различных элементов с поверхностью зерен находится в периодической зависимости от атомного номера элементов, что соответствует периодическому закону Менделеева. Этот факт может служить теоретической базой для прогнозирования прочностных свойств стали с различным составом легирующих и примесных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Козаков А. Т., Кравченко В. Н., Никольский А. В. Исследование фрикционного переноса политетрафторэтилена методом рентгеноэлектронной спектроскопии // Вестник машиностроения. — 1985. — № 2. — С. 33–36.
2. Кравченко В. Н., Козаков А. Т., Колесников В. И., Мигаль Ю. Ф., Никольский А. В. Исследование образования пленки фрикционного переноса антифрикционного самосмазывающегося композита на основе волокон политетрафторэтилена // Динамика и прочность подвижного состава: Межвуз. темат. Сборник. — 1986. — № 185. — С. 75–80.
3. Никольский А. В., Козаков А. Т., Кравченко В. Н. Динамика изменения химического состояния поверхностей трения металлополимерного сопряжения в процессе фрикционного взаимодействия // Трение и износ. — 1988. — Т. 9. — № 5. — С. 860–869.
4. Чебаков М. И., Ляпин А. А., Колесников И. В. Расчет температурных полей при взаимодействии тормозной колодки и железнодорожного колеса на основе термоупругой модели // Вестник РГУПС. — 2013. — № 2. — С. 76–79.
5. Колесников В. И., Мигаль Ю. Ф., Доронькин В. Н., Новиков Е. С., Колесников И. В. Взаимодействие атомов примесных и легирующих элементов с поверхностью зерен в стали // Вестник научного центра РАН. — 2012. — Т. 8. — № 4. — С. 27–33.
6. Анализ поверхности методами оже- и рентгеноэлектронной фотоэлектронной спектроскопии: Пер. с англ. / Под ред. Д. Бриггса, М. П. Сиха. — М.: Мир, 1987. — 600 с.
7. Seah M. P. Adsorption-induced interface decohesion // Acta Metallurgica, 1980, V.28, pp.955–962.
8. Колесников В. И., Мигаль Ю. Ф., Мижирицкая С. Н., Доронькин В. Н. Квантово-химическое исследование влияния зернограницной сегрегации на износостойкость стали // Трение и износ. — 2008. — Т. 29. — № 2. — С. 134–143.
9. Te Velde, G., Bickelhaupt, F. M., Gisbergen van, S. J. A., Fonseca Guerra, C., Baerends, E. J., Snijders, J. G., Ziegler, T. Chemistry with ADF. Journal of Computational Chemistry, Vol. 22, No. 9, 931–967 (2001).
10. Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В. Границы зерен в металлах. — М.: Металлургия, 1980. — 156 с.

Координаты автора: Колесников И. В. — kvi@rgups.ru.

Статья поступила в редакцию 12.12.2014, принята к публикации 15.02.2015.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–29–00116).