Methods and Means of Reducing Energy Load and Hydrogen Wear of Friction Pairs of the Band-Shoe Brake of the Drilling Winch

V.S. Skrypnyk¹, M.Y. Javadov², V.T. Balonniy³, D.A. Volchenko¹, I.O. Bekish¹, N.A. Volchenko⁴, A.S. Yevchenko⁴

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Karpatska st. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

² Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

³ Drohobych College of Oil and Gas (M. Hrushevskoho st. 57, Drohobych, 82100, Ukraine)

⁴ Kuban State University of Technology (Moskovskaya st. 2, Krasnodar, 350072, Russia)

For correspondence:

Skrypnyk Vasily / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Abstract

In the materials of the article, the issues are considered in relation to the problem being solved: the construction of crystal lattices of metals and their parameters; assessment of the state of atoms in the crystal lattice of a metal from the standpoint of molecular dynamics; stress-strain state of brake discs and centers of hydrogen wear of their working surfaces. In the study of a metal friction element, a model of a multilayer atomic structure in the form of a bellows was adopted, which, under the action of pulsed specific loads, compresses its corrugations. When the load is removed, the multilayer atomic structure expands due to the elastic forces. It was found that the rate of the process of compression is hundreds of times higher than the rate of the process of expansion of a multilayer atomic structure.

Keywords: braking devices, metal friction element, crystal lattice, atoms, temperature, subsurface layer.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_25_40

For citation:

Skrypnyk V.S., Javadov M.Y., Balonniy V.T., Volchenko D.A., Bekish I.O., Volchenko N.A., Yevchenko A.S. [Methods and means of reducing energy load and hydrogen wear of friction pairs of the band-shoe brake of the drilling winch]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 25-40 (in Russian)

Qazıma bucurqadının lentli-kündəli əyləcinin sürtünmə cütünün enerji yüklənməsinin və hidrogen yeyilməsinin azaldılmasının metod və vasitələri

V.S. Skripnik¹, M.Y. Cavadov², V.T. Balonniy³, D.A. Volçenko¹, İ.O. Bekiş¹, N.A. Volçenko⁴, A.S. Yevçenko⁴

¹ İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç.15, İvano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

² Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

³ Droqobıç ixtisaslaşdırılmış neft və qaz kolleci (Xruşovskoqo küç. 57, Droqobıç, 82100, Ukrayna)

⁴ Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

Yazışma üçün:

Skripnik Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Xülasə

Məqalədə aşağıdakı məsələlərə baxılıb: metalların və onların parametrlərinin kristal qəfəslərinin qurulması; metalın kristal qəfəsindəki atomların vəziyyətinin molekulyar dinamika nöqteyi-nəzərindən qiymətləndirilməsi; əyləc disklərinin və onların işçi səthlərinin hidrogen yeyilmə nöqtəsində gərginlik-deformasiya vəziyyəti. Metal sürtünmə elementinin tədqiqi zamanı impuls məxsusi yüklərin təsiri altında onun büzmələrini sıxan silfon şəkilli çoxqatlı atom quruluşunun modeli qəbul edilib. Göstərilmişdir ki, çoxqatlı atom quruluşunun sıxılma prosesinin axın tempi genişlənmə prosesinin axın tempindən yüz dəfələrlə yüksəkdir.

Açar sözlər: əyləc qurğuları, metal friksion element, kristal qəfəs, atomlar, temperatur, səthaltı təbəqə.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_25_40

УДК: 625.08

Методы и средства снижения энергонагруженности и водородного износа пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки

В.С. Скрыпнык¹, М.Я. Джавадов², В.Т. Балонный³, Д.А. Вольченко¹, И.О. Бекиш¹, Н.А. Вольченко⁴, А.С. Евченко⁴

 1 Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

(ул.Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

² Азербайджанская инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

³ Дрогобычский специализированный колледж нефти и газа (ул. М. Хрущевского 57, Дрогобыч, 82100, Украина)

⁴ Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

<u>Для переписки:</u>

Скрыпнык Василий / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы применительно к задачам: построение кристаллических решеток металлов и их параметры; оценка состояния атомов в кристаллической решетке металла с позиций молекулярной динамики; напряженно-деформируемое состояние тормозных дисков и очаги водородного износа их рабочих поверхностей. При исследовании металлического фрикционного элемента принята модель многослойного атомного построения в виде сильфона, который под действием импульсных удельных нагрузок сжимает свои гофры. Установлено, что темп протекания процесса сжатия в сотни раз больше темпа протекания процесса расширения многослойной атомной структуры.

Ключевые слова: тормозные устройства, металлический фрикционный элемент, кристаллическая решетка, атомы, температура, подповерхностный слой.

Введение

В результате кооперативного (синергетического) взаимодействия поверхностных процессов, явлений и эффектов: экзоэмиссии, адгезии, адсорбции и диффузии, трибодеструкции, которые приводят к выделению водорода.

Источником для водорода являются влажный воздух, который омывает пары трения тормоза при движении транспортных средств, вода попадающая на рабочие поверхности их фрикционных узлов. Увеличивает количество внешнего водорода крекинг-процесс поверхностного слоя полимерной накладки.

Совместно с неравновесными процессами, идущими при деформации, носящей характер трансляционно-ротационных вихрей пятен контактов микровыступов металлического фрикционного элемента. На поверхностном и подповерхностном слое металла, возникают температурные градиенты, электрические и напряжённодеформированные поля. Это приводит к диффузии водорода в металл, концентрации его в подповерхностном слое и ускоренному износу или разрушению этого слоя.

Состояние проблемы

Многообразные структуры углеродистых и легированных сталей приводят к тому, что при одинаковом типе кристаллической решетки различные марки сталей по-разному реагируют на фрикционное взаимодействие и имеют неодинаковые характеристики износостойкости.

Кроме того, химико-термическая и термохимическая обработка также оказывает значительное влияние на структуру и триботехнические свойства поверхностного и подповерхностного слоев, являющихся аккумулятором водорода в их объеме.

Изнашиванию субшероховатости поверхностей трения в водородосодержащей среде посвящена работа [1, 2]. Водород закачивается в подповерхностный слой металлического тела и взаимодействует с его кристаллической решеткой. Отмечено, что движущей силой в процессах водородного изнашивания являются температура, давление, деформация, структура и дефекты кристаллической решетки.

В работах [3-6] рассмотрено взаимодействие водорода с металлами и неметаллическими элементами. Иллюстрируется влияние водорода на различные свойства металлов и сплавов и на возникновение в них специфических дефектов. Расширены сведения о водородной хрупкости и влиянии водорода на механические характеристики в паре «водород - металл» в группах периодической системы Д.И. Менделеева.

В работе [7] установлена связь между схватыванием металлов при трении и кристаллическом строении металлов. Показано, что пара металлов, имеющая объемногранецентрированную кубическую (ОЦК и ГЦК) решетку, интенсивно изнашивается за счет схватывания. Пары трения из металлов, имеющих гексагональною плотноупакованную (ГПУ) решетку, изнашиваются значительно меньше, чем с ГЦК или ОЦК решеткой. Большое различие в интенсивности изнашивания металлов с различными типами решеток объясняется возможностью возникновения и развития водородного износа.

В работе [6] установлено, что при тя-

желых режимах трения максимальная температура образуется на некоторой глубине от поверхности трения. Это создает условия, при которых водород, если он будет адсорбирован на поверхности детали, под действием температурного градиента диффундирует вглубь поверхности, там концентрируется, вызывает охрупчивание поверхностных слоев и усиливает изнашивание. Однако не было указано, что происходит в подповерхностном слое металлического элемента со структурами его кристаллических решеток.

Становление моделирования связано с появлением «компьютерных технологий», совершенствование и увеличение быстродействия которых позволяет увеличить размеры модельного кристалла и количество итераций расчетного процесса, тем самым расширить круг определяемых параметров.

Попытки наиболее достоверно реализовать межатомные взаимодействия в кристаллической решетке металла в компьютерном эксперименте сталкиваются со следующими проблемами: какова скорость счета с помощью компьютерного эксперимента и ее погрешность; насколько точно описывается потенциал реальных межатомных взаимодействий и движения внутреннего водорода в системе кристаллических решеток тела; наглядность и разнообразие визуализаторов структуры.

Разработка математического и численного аппарата, в основу которого заложены представления о многочастичной системе и симметрии кристаллической решетки в металлах, требует наличия банка данных о поведении в ней шаровидных атомов.

Постановка задачи

В статье рассмотрены следующие вопросы применительно к решаемой проблеме: построение кристаллических решеток металлов и их параметры; оценка состояния атомов в кристаллической решетке металла с позиций молекулярной динамики; напряженно-деформируемое состояние тормозных дисков и очаги водородного износа их рабочих поверхностей.

Цель работы – исследовать кристаллическую структуру металлического фрикционного элемента тормоза с учетом водородного износа рабочей поверхности.

Построение кристаллических решеток металлов и их параметры

Почти 80% всех элементов в табл. Д.И. Менделеева являются металлами. В силу ненасыщенности и ненаправленности металлической связи атом стремится окружить себя как можно большим числом соседей, поэтому кристаллические решётки металлов имеют высокую симметрию, большое координационное число и компактность упаковки.

Более 80% всех металлов имеют решетки типа гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагонально-плотноупакованная (ГПУ) или решетку объемноцентрированную кубическую (ОЦК). Многим металлам свойствен полиморфизм они изменяют тип кристаллической решетки поверхностно-объемной температурой и импульсными нагрузками, действующими на металлический фрикционный элемент тормозного устройства.

На рис.1 представлена схема построения структуры кристаллических решеток металлов.



Рисунок 1 – Схема построения структуры кристаллических решеток Figure 1 – Diagram of crystal lattice structure

Координационное число (КЧ) для ГЦК-решетки z = 12: каждый атом имеет 6 ближайших соседей в своём слое и по 3 – в выше- и нижележащих слоях. На элементарную ячейку приходится n=4 атома, поэтому коэффициент компактности

$$k = \frac{n \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{a^3} \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a^3} = 0,740 \ (74\%)$$

Эти значения z и k являются максимально возможными для решёток простых веществ.

Кратчайшее межатомное расстояние – (вдоль диагоналей граней куба), поэтому радиус атома равен $R = a\sqrt{2}/4$. Плоскость (по оси у) в ГЦК-структуре является плот-

ноупакованной (ПУ) – атомы в ней уложены в узлах.

Между шаровидными атомами в слое имеются треугольные лунки двух типов: острием вниз (тип В) и вверх (тип С); буквой А обозначим центры атомов (рис. 2а, б, в). Чтобы второй ПУ слой плотно прилегал к первому, его атомы должны лежать в лунках первого слоя: атом 7 лежит в лунке типа В, образованной атомами 1, 2 и 3, и точно так же уложены атомы 8 и 9. Третий слой (атом 10) лежит в точно таких же лунках второго слоя, находящихся над лунками типа С первого слоя атомов. Четвёртый ПУ слой окажется расположенным точно над первым, то есть будет проецироваться в позицию А. Период укладки состоит из трех плоскостей: АВС АВС АВС... Каждый следующий плотноупакованный слой (плоскости оси у) в ГЦК-решетке сдвинут относительно предыдущего на один и тот же вектор 1/2а (плоскости оси z) или 1/6а (плоскости оси х) в проекции на плоскость оси у.

При плотном прилегании слоев друг к другу между её параметрами (длиной ребра основания а и высотой с) должно соблюдаться <u>соотношение</u> c/a = $(8/3)^{1/2}$ =1,633. В этом случае координационное число *z* и компактность упаковки *к* для ГПУструктуры будут такими же, как для ГЦК. Но в действительности ни для одного металла отношение с/а не равно идеальному: у Zn и Cd решётка «растянута» вдоль оси с(c/a =1,86 и 1,89, соответственно), а остальных ГПУ-металлов – «сжата» (c/a =1,57 -1,62) (рис. 3а, б).



Рисунок 2 а, б, в – Упаковка атомов (а) в кристаллической решетке и их расположение в трехмерном (б) и двомерном (в) пространстве

Figure 2 a, b, v - Packing of atoms (a) in the crystal lattice and their location in three-dimensional (b) and twodimensional (in) space



Рисунок 3 а, б – Искажение кристаллической решетки при электротермомеханическом трении: а – растяжение; б - сжатие

Figure 3 a, b – Distortion of the crystal lattice during electrothermomechanical friction: a - stretching; b - compression

Если придерживаться модели твёрдых слоев, то в первом случае слои остаются отодвинуты друг от друга, а во втором – атомы соседних слоёв друг друга касаются, но в самом слое между атомами появляется зазор, и поэтому все реальные ГПУструктуры не являются истинно ПУ-ми. В действительности же отличие означает, что атомы в <u>ГПУ-металлах</u> имеют форму не шаров, а эллипсоидов (сжатые шары атомов с соотношением в плоскостях 1,633 $< \frac{C_r}{d_2} > 1,633$ [7].

Возможны и другие, более сложные законы чередования слоёв в плотноупако-

ванных решётках. Например, для многих лантаноидов характерна четырехслойная структура: ABCB, ABCB... (сдвиги чередуются по 2: + + - -). Встречаются структуры с семи-, девяти- и даже восемнадцатислойной укладкой.

Молекулярная динамика при оценке состояния атомов в кристаллической решетке металла

Наиболее интенсивно в настоящее время развивается метод молекулярной динамики (МД). Сущность его заключается в оценке траекторий движения частиц, моделирующих конкретный физический объект: отдельную крупную молекулу водорода или жидкости в твердом теле. Метод МД с использованием классической механики базируется на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения Ньютона для системы атомов. Впрочем, существуют работы, в которых этот метод комбинируется с решением уравнений квантовой механики Шредингеpa.

При моделировании физических про-

цессов на атомном уровне энергия межатомного взаимодействия или внутренняя (потенциальная) энергия рассматривается как фундаментальное свойство кристалла. Одним из основных условий успеха моделирования процессов на атомном уровне является корректное описание межатомного взаимодействия. При этом универсального потенциала взаимодействий атомов не существует.

Наиболее простой метод описания заключается в использовании парных потенциалов, в которых имеют место следующие ограничения: все межатомные взаимодействия изотропны и аддитивны, силы действуют между центрами частиц, составляющих кристаллическую решетку; поверхностные эффекты не учитываются.

В такой системе энергия кристалла может быть представлена как сумма парных взаимодействий между центрами атомов. В этом случае потенциальная энергия системы N атомов равна:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1, i \neq j}^{N} \sum_{j=1}^{N} \varphi_{ij}(r_{ij})$$
(1)

где φ_{ij} - потенциальная функция взаимодействия пары отдельных атомов і и j; r_{ij} расстояние между і и j атомами.

Ограничение парным потенциалом межатомного взаимодействия значительно упрощает вычисления при расчетах систем с большим число частиц, но возможны также применения потенциалов более сложных форм (многочастичных, первопринципных и т.д.).

Система уравнений движения атомов в нерелятивистском случае имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dr_i}{dt} = \vartheta_i \\ \overline{m_i \frac{d\vartheta_i}{dt}} = F_i \end{cases}$$
(2)

где t – время.

Позиции и скорости всех N атомов расчетной ячейки характеризуются $2\zeta N$ координатами (ζ - размерность расчетной ячейки) $V_i^k(t) = \frac{dx_i^k(t)}{dt}$ - скорости (k - индекс координатной оси); $dX_i^k(t)$ - описывают позиции в пространстве.

Для решения системы уравнений (2) применяют численный метод интегрирования дифференциальных уравнений. Использование широко известного метода Эйлера с выбранным полушагом позволяет получить систему уравнений в конечных разностях:

$$\vartheta_{i}^{k}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \vartheta_{i}^{k}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t m^{-1}}{2}F_{i}^{k}(t)$$

$$x_{i}^{k}(t + \Delta t) = x_{i}^{k}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \Delta t\vartheta_{i}^{k}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$$
(3)

где Δt – шаг интегрирования.

При выборе шага интегрирования пользуются эмпирическим правилом, согласно которому флуктуации полной энергии системы должны быть меньше флуктуации потенциальной энергии. Чтобы понизить величины энергетических флуктуаций на параметр времени Δt накладывают математическое и физическое ограничение.

Математическое ограничение соответствуют погрешностям округлений, связанных с выполнениями математических операций. Физические ограничение обусловлены тем, что шаг интегрирования должен быть, по крайней мере, менее ¹/₄ наименьшего периода атомных колебаний.

В газообразном и особенно кристаллическом состоянии при определенной температуре атомы совершают периодические колебания относительно положения, соответствующего минимуму потенциальной энергии. Если шаг интегрирования выбрать больше 1/4 наименьшего периода, колебания станут апериодическими, что должно привести к возрастанию энергии и разрушению структуры из-за действия водорода.

Температура расчетной ячейки задается через начальные скорости атомов в соответствии с распределением вероятностей сих плотностью по Максвеллу.

Начальные скорости обычно выбирают от одинаковыми по абсолютной величине со случайными направлениями. При этом полная кинетическая энергия должна соответствовать заданной объемной температуре, а суммарный импульс расчетной ячейки должен быть равен нулю.

$$|\vartheta_i| = \vartheta_{\rm KB} \sqrt{2} = \sqrt{\frac{2\zeta kT}{m_i}}, \sum_{i=1}^N m_i \vartheta_i = 0 \qquad (4)$$

где k - постоянная Больцмана, T – объемная температура, $\vartheta_{\rm KB}$ – среднеквадратичная скорость атома.

Исходное распределение скоростей в процессе моделирования быстро приближается к вероятности с их плотностью (Р) по Максвелу. Так как начальные положения атомов соответствуют минимально возможной потенциальной энергии, в процессе колебаний половина кинетической энергии переходит в потенциальную. Поэтому начальные скорости атомов должны быть в $\sqrt{2}$ больше среднеквадратичной $\vartheta_{\rm KB}$. Применение $\vartheta_{\rm KB}$, а не наиболее вероятной скорости объясняется тем, что кинетическая энергия и объемная температура пропорциональны $< \vartheta_i^2 >$.

Начальные значения координат ато-

мов задаются, в зависимости от решаемой задачи, при этом взаимоперекрывающиеся структуры исключаются. При объемных температурах атомы в кристалле имеют определенные скорости колебаний. В компьютерном эксперименте начальные скорости обычно задаются одинаковыми по абсолютной величине, но случайными по направлениям. При этом полная кинетическая энергия должна соответствовать заданной объемной температуре, а суммарный импульс в расчетной ячейке должен быть равен нулю.

Объемная температура расчетной ячейки находится из выражения

$$T = \frac{2E}{\zeta Nk} \tag{5}$$

В рассматриваемом методе ограничиваются объемом расчетной ячейки порядка $10^3 \cdot 10^6$ атомов. С макроскопической точки зрения это чрезвычайно мало. Поэтому, чтобы результаты можно было распространить на макрообъем, на расчетный блок накладываются граничные условия, позволяющие с некоторым приближением "сшивать" расчетную ячейку с внешним объемом.

Сила, действующая на *i*-й атом, будет равна:

$$F_i = -\sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{d}{d(r_i - r_j)} \varphi_{ij} \left(\left| r_i - r_j \right| \right)$$
(6)

где d – диаметр шара атома; r_i, r_j - радиусвекторы *i*-го и *j*-го атомов.

Парные потенциалы относятся к эмпирическим потенциалам основанным на простых выражениях, содержащих параметры, которые могут быть выбраны так, чтобы потенциал правильно описывал одно из свойств вещества. Атомистическое моделирование, в том числе методом МД, основывается на математическом описании взаимодействия между атомами. От точности этого описания зависит успех решения конкретной задачи и точность прогнозирования, сделанных на основе результатов моделирования. При моделировании классическими методами взаимодействия описываются с помощью парной функции φ_{ij} , определяющей зависимость потенциальной энергии системы состоящей из атомов и их координат.

При решении задачи молекулярной динамики осуществляется контроль над потенциальной U и кинетической E энергиями расчетной ячейки. Кинетическая энергия определяется по формуле:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_i^N m_i \vartheta_i^2 \tag{7}$$

где m_i и ϑ_i^2 - масса и скорость і-го атома.

При выборе шага интегрирования Д используют эмпирическое правило: флуктуаций полной энергии системы не должны превышать флуктуации потенциальной энергии. Как правило, шаг интегрирования в методе молекулярной динамике выбирается таким образом, чтобы он был примерно на два порядка меньше временного периода колебания атомов, который составляет 10⁻¹³-10⁻¹⁵с. Начальные значения координат задаются псевдоусловно. Сначала определяются параметры решетки, соответствующие минимуму потенциальной энергии кристалла. Затем выполняется предварительная релаксация кристаллической решетки с целью выявления устойчивого равновесия системы атомов. При повышении объемной температуры тела учитывается коэффициент теплового расширения решетки, связанный с увеличением межатомных расстояний.

Напряженно-деформированное состояние материала тормозного диска.

В каждом металлическом фрикционном элементе различных видов тормозов действуют внутренние напряжения различного происхождения, которые существуют вне зависимости от того, нагружен данный элемент или нет.

Напряжения бывают временными или постоянными - остаточными. Величина внутренних напряжений часто бывает того же порядка, что и возникающих напряжений при электромеханическом трении узлов тормозов.

Внутренние напряжения классифицируются по признакам протяженности силового поля и по своей физической сущности.

Общепринятой является классификация по первому признаку. Согласно этой классификации различают три вида внутренних напряжений [8].

Начальные скорости частиц представляют собой распределение Максвелла-Больцмана. Последнее распределение – статически равновесная функция f(p,V)распределения по импульсам p и координатам r частиц водорода соответствующее данной температуре.

Это можно выразить:

$$\frac{N(\nu)}{N} = \sqrt{\frac{m}{2PkT}} \exp(\frac{m\nu^2}{2kT})$$
(8)

где N(v) — количество частиц, которые имеют скорость v.

Чтобы сохранить температуру системы, требуется ввести следующее дополнение

$$\nu_i^{final} = \nu_i \sqrt{\frac{T_d}{T_a}} \tag{9}$$

где v_i^{final} – скорость частицы і после искривления; T_d и T_a – прогнозируемая и фактическая температуры системы.

Напряжение на плоскости *m* и в направлении п рассчитывается с помощью выражения

$$\sigma_{mn} = \frac{1}{N_s} \sum_i \left[\frac{m_i v_i^m v_i^n}{V_i} - \frac{1}{2V_i} \sum_j \frac{\partial \phi(r_{ij}^m)}{\partial r_{ij}} \frac{r_{ij}^m r_{ij}^n}{r_{ij}} \right]$$
(10)

где N_s - количество частиц, содержащихся в области S, а S определяется как область

взаимодействия атомов; r_{ij}^m и r_{ij}^n два компонента вектора от атома і до ј: Vi- объем, определенный для атома і и выраженный:

$$V_i = rac{4 p a_i^3}{3}$$
, где $a_i = rac{\sum r_{ij}^{-1}}{\sum r_{ij}^{-2}}$

Форма, выраженная в уравнении (10) содержит два значения σ_{mn} справа, первое - кинетическая часть, вызванная движением атомов, а второе - потенциальная часть, вызванная силой взаимодействия атомов.



Рисунок 4 а, б, в – Моделирование напряжений: а - механических; б - температурных; в - суммарных, развивающихся в сплошном тормозном диске переднего механизма автомобиля BA3-2110 при расположении фрикционных накладок на максимальном (I), среднем(II) и минимальном (III) радиусе диска **Figure 4 a, b, v** – Modeling stresses: a - mechanical; b - temperature; c - total, developing in a solid brake disc of the front mechanism of a VAZ-2110 car when the friction linings are located at the maximum (I), average (II) and minimum (III) disc radius

Деформация в Z-направлении рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{l_{def} - l_0}{l_0} \times 100\% \tag{11}$$

где l_0 , l_{def} – длины: растяжения в z направлении, первоначальная.

Используя формулы (10) и (11) можно получить кривую напряжения – деформации, и тогда из кривой определить модуль упругости материала.

Как правило, механические свойства зависят от нагрузки, объема и температуры металлического фрикционного узла.

Для исследования механических и тепловых напряжений, а также их градиентов использовался метод конечноэлементного моделирования с помощью программы AnsysWorkbench, в которой рассматривался фрикционный узел «дискнакладки» [9].

В первом варианте размещения фрикционных накладок колодок на тормозном диске (на максимальном радиусе диска, рис. 4, I б, в) следует отметить следующее применительно к зонам действия различных видов напряжений:

<u>механических (рис. 4, I а)</u>

- максимальные величины напряжений (4,55МПа) наблюдались в средней части по толщине тормозного диска выше нижней точки фрикционных накладок колодок (зона I);

- в зоне II возникает очаг больших градиентов механических напряжений (0,58МПа/мм), который является зоной концентраторов напряжений от действия сжимающих сил фрикционными накладками колодок;

температурных (рис. 4, I б)

- наблюдается три очага напряжений (зона III - 80,0МПа, зона IV - 105,2МПа и

зона V - 53,1МПа) отвечающие нижней точке фрикционных накладок колодок и концентрации напряжений в сопряжении горизонтальной и вертикальной фланцевой части диска;

- градиент температурных напряжений по радиусу диска равномерный, и составляет в среднем 2,03МПа/мм;

суммарных (механические + тепловые)

<u>(рис. 4, I в)</u>

- возникают три очага напряжений (зона VI - 83,2МПА, зона VII -105,2МПа и зона VIII - 53,1 МПа) также, как и при рассмотрении температурных напряжений, с той разницей, что в зоне VII имеются максимальные механические напряжения, которые усиливают суммарные напряжения.

- градиенты напряжений такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений (в среднем 2,03МПа/мм), только в зоне VII не значительно увеличились из-за величины действия механических напряжений.

Во втором варианте размещения фрикционных накладок колодок на тормозном (в средней части радиуса диска, рис. 4 а, б, е) следует отметить следующее применительно к зонам действия различных видов напряжений:

механических (рис. 4, II а)

- возникают два очага механических напряжений (зона I - 4,67МПа и зона II - в точках, отвечающим ниже верхней и выше нижней части фрикционных колодок посредине толщины тормозного диска;

- максимальные величины градиентов механических напряжений наблюдались в зонах III' и IV', отвечающим верхней и нижней части фрикционных насадок колодок, и составляли, соответственно, 0,52

и 0,54 МПа/мм;

температурных (рис. 4, II б)

- также наблюдаются три очага напряжений (зона V' - 72,8МПА, зона VI' – 121,1 МПа и зона VII' - 48,9МПа) отвечающие, соответственно, нижней точке фрикционных накладок колодок и концентраций напряжений в сопряжении горизонтальной и вертикальной фланцевой части диска.

Следует отметить, что разница между первым вариантом размещения фрикционных накладок колодок по отношению к диску состоит в том, что V' образовалась ниже зоны III (см. рис. 4. II б) и начинает сливаться с зоной 4(I).

- градиент напряжении по радиусу диска менее равномерный; чем в первом варианте размещения фрикционных накладок колодок: меньший в верхней части по радиусу диска (зона VIII' – 1,5 МПА/мм) и больший в нижней части по радиусу диска (зонах V' – VI '- 2,47 МПА/мм);

суммарных(механические + тепловые)

(рис. 4, III в)

- возникают три очага напряжений (зона IX' - 75,6МПА, зона X' - 122,2МПа и зона XI' - 49,9МПа) также, как и при рассмотрении температурных напряжений, с той разницей, что в зоне IX' развиваются максимальные механические напряжения, которые усиливают суммарные напряжения;

- градиенты напряжений такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений, только в зоне IX' незначительно увеличивается из-за действующих механических напряжений.

В третьем варианте размещения фрикционных накладок колодок на тормозном диске (в нижней части радиуса диска, рис. 4, III *а*, *б*, *в*) следует отметить следующее применительно к зонам действия различных видов напряжений:

механических (рис. 4, III a)

- возникают два очага механических напряжений (зона I" - 4,7МПа и зона II" -4,73МПа) в точках, отвечающим ниже верхней и выше нижней части фрикционных накладок колодок посредине и правее середины толщины тормозного диска, соответственно;

- что касается градиентов механических напряжений, то в точках, отвечающим верхней и нижней части фрикционных накладок колодок наблюдались максимальные их величины (зоны III" и IV", и составляют, соответственно, 0,59 и 0,62МПа/мм;

<u>температурных</u> (рис. 4, III б)

- образовались два очага напряжений (зона V" - 122,1 МПа и зона VI" - 48,9МПа) отвечающие, соответственно, нижней точке фрикционных накладок колодок и концентрации напряжений в сопряжении вертикальной фланцевой части диска. Следует отметить, что разница между вторым вариантом размещения фрикционных накладок колодок по отношению к диску состоит в том, что зона V" образовалась вследствие слияния зон, отвечающих нижней точке фрикционных накладок колодок и концентрации напряжений от сопряжения горизонтальной фланцевой части диска;

- градиент напряжений по радиусу диска менее равномерный, чем в первом и втором варианте размещения фрикционных накладок колодок: меньший в верхней части по радиусу диска (зона VII" - 1,65 МПа/мм) и больший в нижней части по радиусу диска (зона V" - 2,73 МПа/мм);

<u>суммарных (механические + тепловые)</u> (рис. 4, III в)

- наблюдаются два очага напряжений (зона VIII" - 147,5МПа и зона IX" – 49,99 Мпа) также, как и при рассмотрении температурных напряжений, с той разницей, что в зоне VIII" развиваются максимальные механические напряжения, которые усиливают суммарные напряжения.

- градиенты напряжений такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений, только в зоне VIII" незначительно увеличивается, из-за действующих механических напряжений.

Прогнозирование водородного износа беговых дорожек трения дисково-колодочных тормозов транспортных средств

Водородный износ беговых дорожек трения дисково-колодочных тормозов связан с внешними эксплуатационными параметрами, которыми являются: импульсные удельные нагрузки, температура вспышки, поверхностно объемная температура и эквивалентное напряжение первого рода (механическое + тепловое).

Параметры структуры металлического фрикционного элемента зависят от: типа конструкции кристаллической решетки, количества атомных слоев, поверхностно-объемной температуры подповерхностного слоя, напряжения второго рода (макроскопические зональные напряжения, охватывающие целый металлический фрикционный элемент), напряжения третьего рода (субмикроскопические, относящиеся к искажениям атомов в слоях твердого тела).

Представим многослойную атомную систему твердого тела в виде сильфона.

В чем же заключается сильфонный

эффект применительно к металлическому фрикционному элементу различных видов тормозных устройств?

Сильфон – тонкостенная (объемнометаллическая) цилиндрическая оболочка с поперечной гофрированной боковой поверхностью: расширяется или сжимается вдоль оси (подобно пружине) под действием разности давления внутри и снаружи или от внешнего воздействия. Применяется в пневмоавтоматике как чувствительный орган [10].

Под действием импульсных удельных нагрузок возникает большой положительный градиент температуры вспышки, который в подповерхностном слое металлического фрикционного элемента превращается в отрицательный градиент поверхностно-объемной температуры. При этом повышается давление закачиваемого водорода, которое усиливается за счет импульсных удельных нагрузок, сжимая многослойную атомную структуру.

При снятии импульсных удельных нагрузок происходит расширение многослойной атомной структуры за счет внутренних сил упругости.

Темп протекания процесса сжатия в сотни раз больше темпа протекания процесса расширения многослойной атомной структуры. Что касается хаотического движения водорода между отдельными атомами и их слоями, то его можно привести к продольному и поперечному движению.

Этапы водородного износа представлены в таблице.

Различают несколько видов водородного охрупчивания первого и второго рода. Охрупчивание первого рода обусловлено источниками, которые имеются в исходном металле вследствие повышенного содержания внутреннего водорода. Охрупчивание второго рода обусловлено источниками, которые аккумулируют в поверхностный слой металла внешний водород.

Установлено, что охрупчивание первого рода является обратимым и усиливается с повышением скорости деформации; второго рода - при малых скоростях деформаций и может быть как обратимым, так и необратимым [11-13].

Теорию водородного охрупчивания можно разделить на **четыре группы.**

1. Адсорбционные гипотезы,

объясняющие снижение разрушающего напряжения вследствие уменьшения поверхностной энергии внутри трещин при адсорбции водорода (водород действует как поверхностно - активное вещество).

2. Диффузионные гипотезы:

- на рабочих поверхностях пары трения «металл - полимер» происходит аномальная диффузия - класс явлений, в которых средний квадрат смещений не является линейной функцией от времени, а описывается степенным законом.

Таблица – Этапы водородного изнашивания рабочих поверхностей металлического фрикционного элемента тормоза при электротермомеханическом трении

Table – Stages of hydrogen wear of the working surfaces of a metal friction brake during electrothermomechanical friction

_	Процессы, явления и эффекты, возникающие при действии	
Этапь	импульсных нагрузок в парах трения тормоза	и их последствия
1	Интенсивное выделение водорода в зоне трения из влаги под действием импульсных удельных нагру- зок	Способствовало триботехническим реакциям за счет температур вспышки
2	Десорбция воды с поверхности пояса трения диска	
3	Адсорбция водорода рабочей поверхностью пояса трения диска	Способствовало адсорбции за счет повышения циклической энерго- нагруженности пояса трения диска
4	Диффузия водорода в подповехностные слои пояса трения диска трущейся пары, скорость которой определяется отрицательными и положительными температурами эквивалентных напряжений	Вызвало градиенты температуры и механо-температурных напряжений;
5	Концентрация водорода в подповерхностном слое в зоне максимальной поверхностно-объемной тем- пературы	Способствовало возникновению в подповерхностном слое отрица- тельных градиентов температуры
6	 а) Низкотемпературное хрупкое разрушение по- верхностного слоя пояса трения диска, насы- щенного водородом, в результате образования большого числа микротрещин в зоне контакта. 	Вызывало положительные градиенты напряжений и молизацию водорода
	б) Высокотемпературное вязкое разрушение тру- щегося металла в виде намазывания на контртело в результате ожижения поверхностного слоя	Пересыщение водородом поверхности пояса трения диска при колебаниях температуры вспышки нагревания порядка 8001000 ⁰ С

Такая диффузия может быть двух типов - супердиффузия (ускоренное блуждание) и субдиффузия (замедленное блуждание). Компьютерная модель агрегации, ограниченной диффузией, представляет собой поле, заполненное частицами, совершающими хаотическое броуновское движение. На поле вносится центр агрегации, к которому «прилипает» всякая случайно прикоснувшаяся частица; начинается рост конгломерата частиц – фрактального кластера. Зачастую в моделировании используется только одна движущая частица.

3. Теория давления молекулярного водорода, согласно которой охрупчивание есть результат градиента давления молекулярного водорода в макро- и микропустотах, а также в трещинах внутри металла. Давление возникает в результате молизации атомарного водорода.

4. Теория взаимодействия внутреннего водорода с кристаллической решеткой металла; водород является разновидностью дефекта, понижающего прочность когезионной металлической связи.

5. Теории, основанные на взаимодействии водорода с дислокациями; водород производит блокирующее действие на дислокации, способствуя возникновению в парах трения блокирующих контактов.

Выявление механизма водородного изнашивания металлических фрикционных элементов тормозных устройств позволяет формулировать основные способы защиты от трибонаводороживания. Торможение процесса проникновения водорода может осуществляться покрытием активных участков поверхности слоем нейтральных молекул. Эффективным способом защиты от водородного износа является введение в состав композиционных материалов оксида меди, что в результате взаимодействия его с водородом приводит к образованию медной пленки, являющейся барьером для проникновения водорода, и к созданию электромагнитного поля за счет крепления медных пластин к перпендикулярно расположенным боковым поверхностям фрикционных накладок по отношению к беговой дорожке трения металлического элемента.

Заключение

Установлено неизвестное ранее явление образования насыщенной водородом зоны в подповерхностном слое металлического элемента трения (обода, диска) тормозного устройства, содержащего в своем теле «внутренний» водород, циркулирующийся между слоями атомов кристаллических решеток, заключающееся в том, что при электротермомеханическом трении в среде происходит водородосодержащей выделение «внешнего» водорода под давлением за счет импульсных удельных нагрузок, поверхностных температурах и их переменных градиентов в зонах трения. Происходят механические и тепловые деформации элементарных ячеек, имеющих форму, геометрическое строение и параметры с определенными соотношениями, коэффициентами упакованности атомами, обеспечивающими компактность кристаллической решетки, при этом ее атомные слои подвержены сжатию и растяжению, способствующим смешиванию поперечных и продольных потоков движущегося внешнего и внутреннего водорода в подповерхостном слое металлического фрикционного элемента, вызывая локальное охрупчивание и разрушение его поверхностей.

REFERENCES

- 1. Garkunov D.N. Tribotekhnika. Vodorodnoe iznashivanie detalej mashin / D.N. Garkunov, G.I. Suranov, Yu.A. Hrustalev. Iz-vo UGTU. Uhta, 2007. 260 s. (*in Russian*)
- 2. Garkunov D.N. O sposobe povysheniya dolgovechnosti kolesnyh i tormoznyh par. Effekt bezyznosnosti v tribotekhnologii / D.N. Garkunov, G.I. Suraigov.. 1998. №1. S. 32-36 (*in Russian*).
- 3. Galaktionova N.A. Vodorod v metallah. M.: «Metallurgiya». 1967. 303 s. (in Russian)
- 4. Kindrachuk M.V., Volchenko D.A, Volchenko N.A. [i dr.] Vliyanie vodovoda na iznosostojkost materialov v parah treniya tormoznyh ustrojstv. *Fiz.-him. mekhanika materialov.* 2017. T.53. №2. S. 135-141. (*in Russian*)
- 5. Diplom № 482 na nauchnoe otkrytie «Yavlenie massoperenosa produktov treniya v metallopolimernyh parah» ot 27.02.2015 g. avtorov A.Kh. Janahmadova , A.I. Volchenko, E.A. Janahmadova i dr. M.: Mezhdunarod. akad. avtorov nauchn. otkr. i izobret. Ekspertiza zayavki na otkrytie №A-618 ot 18.12.2014 g. (*in Russian*)
- 6. Nauchnoe otkrytie [Diplom №378]. A.A. Polyakov, D.N. Garkunov, G.P. Shpenkov, V.Ya. Matyushenko. Yavlenie obrazovaniya nasyshchennoj vodorodom zony v podpoverhnostnom sloe metallov pri trenii (yavlenie vodorodnogo iznashivaniya metallov). 1990. №30 (*in Russian*).
- 7. Mashkov Y.K. Tribofizika metallov i polimerov. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2013. 240 s. (in Russian)
- 8. Janahmadov A.Kh., Pirverdiev E.S., Volchenko N.A. [i dr.] Elektrotermomekhanicheskij iznos i razrushenie obodov tormoznyh shkivov burovyh lebedok (chast III). Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii, 2016. T. 8, №1, s. 27-51 (in Russian)
- 9. Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Pirverdiev E.S. [i dr.]. Diskovo-kolodochnye tormoznye ustrojstva: teoriya, raschet i konstruirovanie (chast I). Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii. №1, 2017. S. 15-31 (*in Russian*).
- 10. **Myshkin N.K.** Tribologiya polimerov: trenie, iznashivanie, adgeziya i frikcionnyj perenos (obzor) (N.K. Myshkin, M.I. Petrokovec, A.V. Kovalev. Trenie i iznos. 2006. T.17, № 4. S. 429-436 (*in Russian*).
- 11. Briscoe B.J., Fiori L., Pellino E. Nano-indentationof polymeric surfaces. J. Phys. D. Applied Phys. 1998 (31), 2395-2405 (*in English*).
- 12. Shulga H., Kovaiev A., Myshkin N., Tsukruk V.V. Some aspects of AFM nanomechanical probing of surface polymer films. European Polymer J. 2004 (40), 949-956 (*in English*).
- 13. Kramer I.R., Demer L.J. Progr. Mater. Science, 1961. V.9. P. 131-199 (in English).

Поступило:	12.10.2021
Доработано:	09.03.2022
Принято:	15.03.2022