

УДК 629.413-592.112

А. В. ВОЗНЬИЙ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА (ЧАСТЬ ВТОРАЯ)

Проиллюстрировано напряженно-деформированное состояние сплошного диска в процессе торможения, а также между торможениями с возникновением и развитием микротрещин на его поверхностях.

Ключевые слова: дисково-колодочный тормоз, тормозной диск, беговая дорожка трения, напряженно-деформированное состояние диска, микротрещина.

Введение. Энергонагруженность пар трения дисково-колодочных тормозов, применяемых в машиностроении (автомобильном и железнодорожном транспорте, подъемно-транспортном оборудовании и в других отраслях техники), в значительной степени зависит от режимов их работы (удельных нагрузок, скорости скольжения, работы трения и т.д.) В работе [1] показано, что для снижения энергонагруженности пар трения дисково-колодочного тормоза необходимо их принудительно охлаждать встречными скоростными токами воздуха. При этом вихревая труба монтируется непосредственно в тело тормозного диска. Для сопоставительного анализа диска с переменным сечением необходимо исследовать по термонапряжениям сплошной тормозной диск.

Состояние проблемы. Остановимся на энергонагруженности пар трения дисково-колодочного тормоза.

Температурное поле самовентилируемого диска с каналами произвольной формы дисково-колодочного тормоза исследовалось методом конечных элементов [2].

Последовательность исследований заключалась в следующем:

– температурное поле самовентилируемого диска описывалась уравнением Фурье при заданной схеме теплового нагружения (рис. 1, а, б);

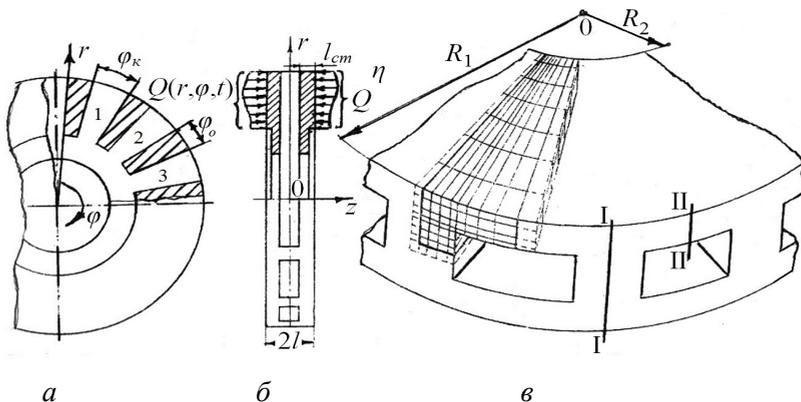


Рис. 1. Продольное (а) и поперечное (б) сечение самовентилируемого тормозного диска с тепловым нагружением (Q – тепловой поток; t – поверхностная температура) его беговой дорожки трения; в – разбиение диска на конечные элементы: постоянного (I-I) и переменного (II-II) сечения его толщины

– производилось разбиение самовентилируемого диска на конечные элементы, исходя из его осесимметричности конструкции с выделением в ней сечений I и II (рис. 1, в);

– задавались граничные, начальные и периодичности условия применительно к уравнению теплопроводности, которые решались численными методами (задавался функционал, который в дальнейшем был минимизирован и привел к системе дифференциальных уравнений);

– полученная система линейных алгебраических уравнений решалась методом конечных элементов.

Однако в данных исследованиях не была дана оценка напряженного состояния поверхностей тормозного диска с точки зрения зарождения и развития на них микротрещин. Кроме того, не было уделено внимание разрушению беговых дорожек трения дисков между торможениями.

В работе [3] рассмотрено разрушение твердых тел при воздействии поверхностно-активного вещества в качестве которого выступает водород. Уделено внимание предельному случаю проявления хемосорбционных эффектов без существенного влияния механических напряжений. Описан рост плоских трещин в твердых средах с регулярными структурами при контакте с поверхностно-активными веществами, когда модель процесса – расклинивание трещин молекулярным клином. Получены оценки критического коэффициента интенсивности напряжений через критическое раскрытие трещины при расклинивании полубесконечным клином постоянной толщины. Получено аномально низкое сопротивление разделению твердого тела на части при определенных условиях (самопроизвольное разрушение).

Однако в представленных материалах не рассмотрена взаимосвязь механических, температурных и химических компонентов напряжений на состояние твердого тела.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к данной проблеме:

– особенности метода конечно-элементного моделирования с помощью программы «Ansys Workbench» напряженного состояния металлических фрикционных элементов;

– напряженно-деформируемое состояние тормозных дисков;

– напряженное состояние в окрестностях вершин микротрещин.

Цель работы – оценить напряженное состояние сплошных тормозных дисков с учетом напряженного состояния в окрестностях вершин возникающих микротрещин.

Особенности метода конечно-элементного моделирования с помощью программы «Ansys Workbench» напряженного состояния металлических фрикционных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. В основе многочисленных методов лежит замена континуальной (непрерывной) модели дискретной моделью, которая имеет конечное число неизвестных. В связи с тем, что количество неизвестных может быть очень большой, что требует многократного применения вычислительных процедур, численные методы чаще всего применяют с помощью компьютеров. Последние используются для анали-

за напряженного состояния металлических фрикционных элементов, а также для оценки скоростных токов воздуха, которые омывают их поверхности.

Среди современных компьютерных программ, которые реализуют МСЭ можно назвать Ansys®, Nastran®, Cosmos/M®, CosmosWorks®, Cosmos FlowWorks®, IСЕМ CFD®. В структурном моделировании МСЭ очень помогает при оценке силовых и жесткостных визуализаций в местах смещений и сгибов и распределения сил и смещений микровыступов металлического фрикционного элемента на микро- и наноровнях.

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину (перемещение, сила, удельные нагрузки, поверхностные температуры и т. д.) можно аппроксимировать моделью, составленной из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется частично-непрерывной функцией, которая строится по значениям исследуемой непрерывной величины.

Комплекс ANSYS предназначен для решения задач механики деформированного твердого тела (МДТТ), его поверхностных температур при условии омывания скоростными токами воздуха. Кроме того, комплекс позволяет решать задачи для разного состояния твердого тела, которое находится под действием силового и теплового нагружения, и учитывать последствия от их действия на его поверхности.

В связи с развитием и широким распространением средств 3D-моделирования, импорт ранее созданных файлов представляется наиболее удобным вариантом создания расчетных моделей, который может применяться в научно-исследовательской практике.

Ansys Workbench – это новое поколение программных продуктов, в основе которых лежит современный объектно-ориентированный подход к глубокому анализу, используя при этом возможности ANSYS. Эта сфера глубокого анализа предоставляет уникальные возможности по интеграции с САД системами (в том числе двунаправленную ассоциативную связь). Можно сочетать процесс проектирования в САД пакете с получением достоверных данных расчетов и проведением оптимизации конструкции.

Workbench Products состоит из модулей: Design Simulation (использует лицензии DesignSpace, Professional, Structural, Mechanical), Design Modeler, DesignXplorer, FE Modeler.

Напряженно-деформируемое состояние тормозных дисков. Для исследования механических и тепловых напряжений, а также их градиентов использовался метод конечно-элементного моделирования с помощью программы Ansys Workbench, в которой рассматривался фрикционный узел «диск-накладки» со следующими исходными конструктивными и эксплуатационными параметрами: материал тормозного диска – сталь 35ХНЛ, удельная нагрузка составляла $p = 4,0$ МПа, поверхностная температура $t_n = 390^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $t_0 = 22^\circ\text{C}$, материал фрикционной накладки ТИИР 240, допустимая температура материалов накладки 390°C .

В первом варианте размещения фрикционных накладок колодок на тормозном диске (на максимальном радиусе диска, рис. 2) следует отметить следующее применительно к зонам действия различных видов напряжений:

механических (рис. 2, а)

– максимальные величины напряжений (4,55 МПа) 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 (0,58 МПа/мм), который является зоной концентраторов напряжений от действия сжимающих сил фрикционными накладками колодок;

температурных (рис. 2, б)

– наблюдается три очага напряжений (зона III – 80,0 МПа, зона IV – 105,2 МПа и зона V – 53,1 МПа) отвечающие, соответственно, 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 2,03 МПа/мм;

суммарных (механические + тепловые) (рис. 2, в)

– возникают три очага напряжений (зона VI – 83,2 МПа, зона VII – 105,2 МПа 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.

– что касается градиентов напряжений, то они такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений (в среднем 2,03 МПа/мм), только в зоне VII незначительно увеличились из-за величины действия механических напряжений.

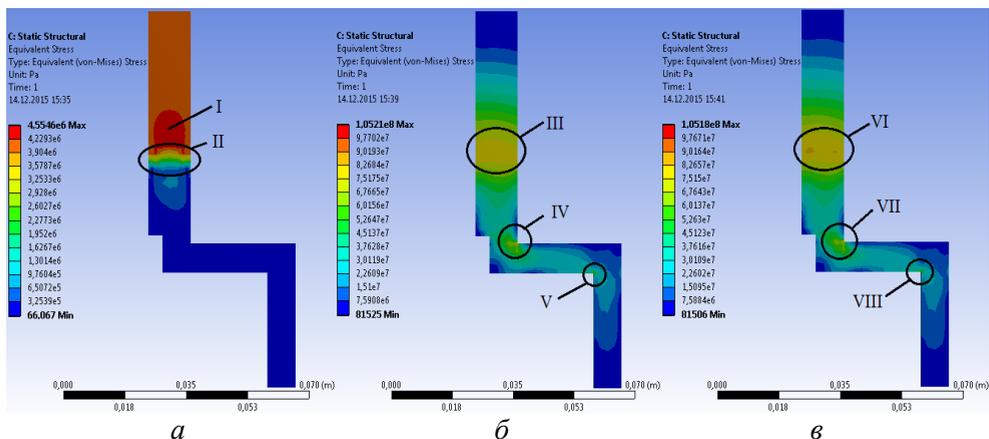


Рис. 2. Моделирование напряжений: а – механических; б – температурных; в – суммарных, развивающихся в сплошном тормозном диске переднего механизма автомобиля ВАЗ-2110 при расположении фрикционных накладок на максимальном радиусе диска

Во втором варианте размещения фрикционных накладок колодок на тормозном диске (в средней части радиуса диска, рис. 3) следует отметить следующее применительно к зонам действия различных видов напряжений:

механических (рис. 3, а)

– возникают два очага механических напряжений (зона I' – 4,67 МПа и зона II' – 4,69 МПа) в точках, отвечающим ниже верхней и выше нижней части фрикционных накладок колодок посередине толщины тормозного диска;

– что касается градиентов механических напряжений, то максимальные их величины наблюдались в зонах III' и IV', отвечающим верхней и нижней части

фрикционных накладок колодок, и составляли, соответственно, 0,52 и 0,54 МПа/мм; температурных (рис. 3, б)

– также наблюдаются три очага напряжений (зона V' – 72,8 МПа, зона VI' – 122,1 МПа и зона VII' – 48,9 МПа) 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 зона V' образовалась ниже зоны III (см. рис. 2, б) и начинает сливаться с зоной VI';

– градиент напряжений 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. 3, в)

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

– что касается градиентов напряжений, то они такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений, только в зоне IX' незначительно увеличивается из-за действующих механических напряжений.

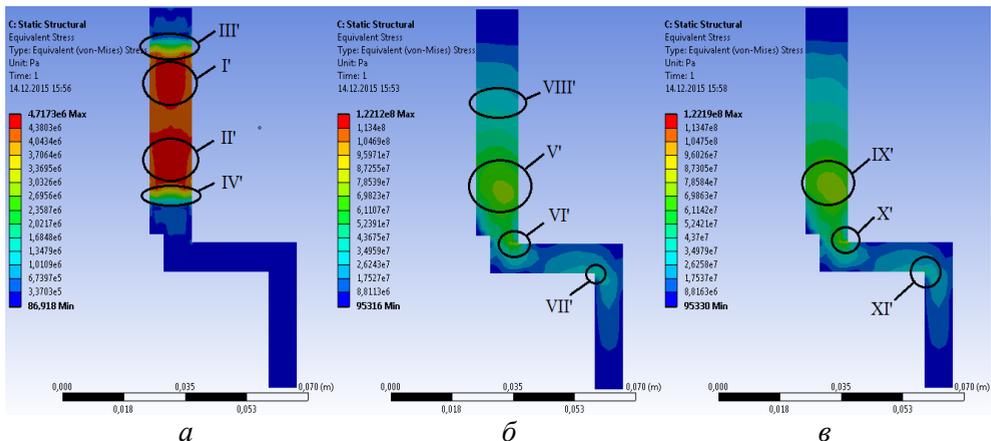


Рис. 3. Моделирование напряжений: а – механических; б – температурных; в – суммарных, развивающихся в сплошном тормозном диске переднего механизма автомобиля ВАЗ-2110 при расположении фрикционных накладок на среднем радиусе диска

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

механических (рис. 4, а)

– возникают два очага механических напряжений (зона I'' – 4,7 МПа и зона II'' – 4,73 МПа) в точках, отвечающим ниже верхней и выше нижней части фрикционных накладок колодок посередине 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 0,62 МПа/мм;

температурных (рис. 4, б)

– образовались два очага напряжений (зона V'' – 122,1МПа 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);

суммарных (механические + тепловые) (рис. 4 в)

– наблюдаются два очага напряжений (зона VIII'' – 147,5МПа и зона IX'' – 49,9 МПа) также, как и при рассмотрении температурных напряжений, с той разницей, что в зоне VIII'' развиваются максимальные механические напряжения, которые усиливают суммарные напряжения.

– что касается градиентов напряжений, то они такие же, как и при рассмотрении температурных градиентов напряжений, только в зоне VIII'' незначительно увеличивается, из-за действующих механических напряжений.

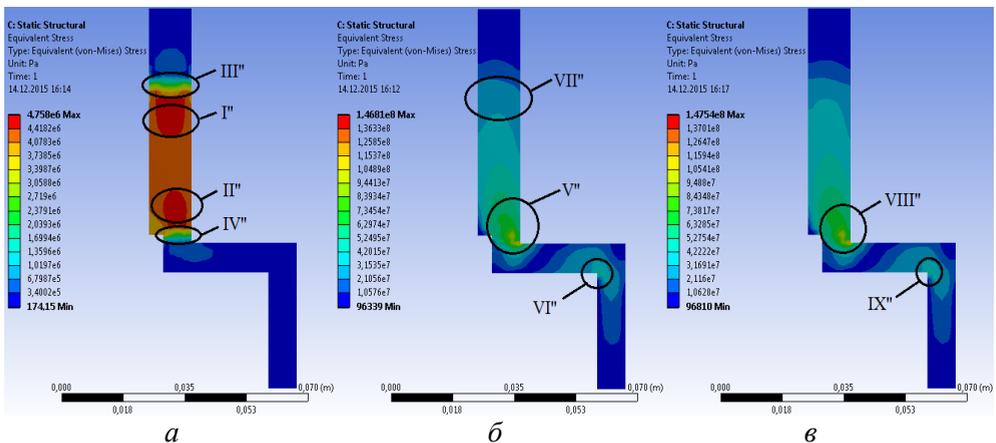


Рис. 4. Моделирование напряжений: а – механических; б – температурных; в – суммарных, развивающихся в сплошном тормозном диске переднего механизма автомобиля ВАЗ-2110 при расположении фрикционных накладок на минимальном радиусе диска

Напряженное состояние в окрестности вершин микротрещин. При рассмотрении монокристаллов стали 35ХН1 (рабочая поверхность диска) наблюдается криволинейные трещины, имеющие волновой фронт распространения. Продвижение микротрещин соответствует самопроизвольному разрушению рабочей поверхности диска при воздействии поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Последним является водород, реагирующий с вновь образованной поверхностью тормозного диска, а в вершине микротрещины на ее поверхностях скапливаются образовавшиеся гидриды представляется возможным смоделировать молекулярным клином. Последний определяет напряженно-деформированное состояние в окрестностях кончика трещины при условии, что $\sigma_p = 0$.

На рис. 5, а, б изображены физические модели монокристаллов с молекулярным клином (рис. 5, в) при этом атомы монокристалла вещества показаны кружками, атомы водорода – точками. На рис. 5, а, б физические модели состоят из одного и двух рядов молекул гидридов. Рис. 5, в сопровождается геометрическими параметрами: $2h$ – толщина клина (микротрещина в механических моделях моделируется двусторонним разрезом); a – расстояние от конца клина до правой вершины микротрещины.

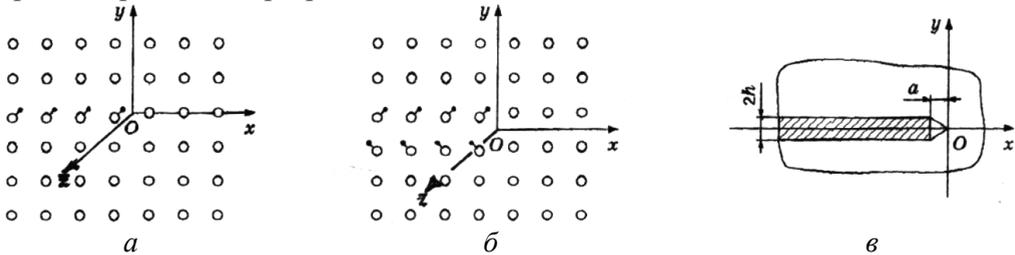


Рис. 5. Физические (а, б) и механические (в) модели: монокристаллов с молекулярным клином (одного [а] и двух [б] рядов молекул гидридов); тела с микротрещиной в которую вмонтирован клин (в) постоянной величины

Пусть ПАВ (водород) хемосорбируется внутри микротрещины на ее поверхностях и образуется новое достаточно устойчивое соединение. В зависимости от положения вновь образованного соединения или гидрида относительно правой вершины микротрещины диаметры их молекул могут играть роль как энергетического моста (разность потенциалов) при действии нагрузок на тело с микротрещиной, так и молекулярного клина при отсутствии нагружения тела микротрещиной.

Остановимся на величинах диаметров молекул в процессе происходящих над ними превращений. Гидриды могут иметь постоянный или переменный молекулярный состав.

Допустим, минимальный диаметр молекулы этого соединения превосходит постоянную кристаллической решетки монокристалла исходного состояния вещества r_e . Далее величина r_e сравнивается с постоянной кристаллической решетки монокристалла гидрида r_e^* , а диаметр молекулы гидрида определяется химической формулой гидрида. Один или два слоя молекул вновь образованного соединения могут иметь подобие молекулярного клина (число слоев молекул гидридов определяется временем протекания химической реакции на вновь образованных поверхностях). При $\sigma_p = 0$ вещество молекулярного клина сжато, и, вообще говоря, существенных ограничений на прочность этого вещества не налагается.

Оценим толщину молекулярного клина, сформированного гидридами FeH_2 в монокристалле Fe. При поглощении водорода поверхностным слоем стали увеличивается объем материала. Последнее приводит к образованию микротрещин в материале, которые, сливаясь в макротрещины, вызывают разрушение поверхностного слоя стали. Трещины проходят по зерну и по местам скопления гидридов. Для толщины молекулярного клина $2h$ имеем соотношения

$$2h \cong r_e^* - r_e, \quad 2h/r_e \cong r_e^*/r_e - 1; \quad (1)$$

$$2h \cong 2r_e^* - 2r_e, \quad 2h/r_e \cong 2(r_e^*/r_e - 1), \quad (2)$$

где $r_e = 2,87 \cdot 10^{-10}$ м, $r_e^* = 4,37 \cdot 10^{-10}$ м – постоянные атомных решеток монокристаллов Fe и FeH₂, соответственно [4]. Соотношения (1) и (2) записаны для молекулярных клиньев, состоящих из одного и двух рядов молекул гидрида FeH₂ соответственно, а расстояние от концов клиньев до вершин трещин $a \approx r_e$ (рис. 5, в). Толщина молекулярного клина, рассчитанная по соотношениям (1) и (2) для монокристаллов Fe и FeH₂ оказывается значительной, так как конец клина расположен очень близко к вершине трещины ($a \approx 2,92 \cdot 10^{-10}$ м). В соотношениях (1), (2) используются знаки « \cong » так как расстояния между атомами в тонком слое гидрида FeH₂ могут отличаться от постоянной решетки r_e^* монокристалла FeH₂, а расстояния между атомами монокристалла в окрестности повреждения, вызванного молекулярным клином, могут отличаться от постоянной кристаллической решетки идеального монокристалла Fe. Соотношения (1) и (2) справедливы и для других состояний веществ, гидриды которых содержат два атома водорода.

Расклинивание трещин молекулярным клином в механической модели.

Вспользуемся представлениями решений для напряжений на продолжении острой трещины $y = 0$ в плоской задаче теории упругости через коэффициент интенсивности напряжений K_I^0 . Тогда для трещин нормального отрыва в окрестности вершины трещины с точностью до величин высшего порядка малости для линейной задачи можно записать

$$\sigma_y(x, 0) \cong \sigma_\infty + K_I^0 / (2\pi x)^{1/2}, \quad (3)$$

где $\sigma_\infty = 0$ – характерные напряжения, заданные на бесконечности. Итак, напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя диска с полубесконечной трещиной определяется только молекулярным клином.

Соотношение K_I^0 для острой полубесконечной трещины при раскалывании поверхностного слоя тормозного диска полубесконечным клином постоянной толщины при отсутствии электротермомеханического трения запишем в виде [5]

$$K_I^0 = \frac{4Gh}{1 + \chi} \sqrt{\frac{2}{\pi a}}. \quad (4)$$

Здесь G – модуль сдвига; $\chi = 3 - 4\mu$; $\chi = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ – для плоского состояния: деформированного; напряженного; μ – коэффициент Пуассона. В

Соотношении (4) используются постоянные G , μ для монокристалла исходного состояния вещества.

Критерий хрупкого разрушения. Рассматриваются монокристаллы с трещинами и с вакансиями металлы. Предложен дискретно-интегральный критерий хрупкой прочности (двумерный случай) для слабейшего монослоя атомов для острых трещин нормального отрыва [6]

$$\frac{1}{kr_e} \int_0^{\pi r_e} \sigma_y(x, 0) dx \leq \delta \sigma_m, \quad (5)$$

где σ_y – нормальные напряжения в вершине трещины (эти напряжения действуют в толще монокристалла вещества с трещиной); Oxy – прямоугольная систе-

ма координат (рис. 5, a , \bar{b}); r_e — расстояние между центрами атомов исходного состояния вещества; n и k — целые числа ($n \geq k$) k — число межатомных связей; nr_e — интервал осреднения; σ_m или $\delta\sigma_m$ — теоретические прочностии при отсутствии [7] или наличии ПАВ в трещине, соответственно; $\delta \leq 1$ — параметр. Параметр δ описывает химически усиливаемое разрушение: в присутствии ПАВ прочность исходного состояния вещества может уменьшаться.

Выполнив соответствующие преобразования (см. (5) и (3)) для острой трещины нормального отрыва при наличии вакансий в носике трещины, имеем зависимость для оценки критического коэффициента интенсивности напряжений

$$K_I^{*0} \leq (k\delta\sigma_m / n)(\pi nr_e / 2)^{1/2}. \quad (6)$$

После подстановки выражения (4) в соотношение (6) получим выражение для критической толщины клина постоянной толщины $2h^*$

$$\frac{2h^*}{r_e} \leq (1 + \chi)(1 + \mu) \frac{\pi}{2} \frac{k}{\sqrt{n}} \frac{\delta\sigma_m}{E} \sqrt{\frac{a}{r_e}}. \quad (7)$$

С учетом оценки теоретической прочности монокристалла [7] $\sigma_m = \eta E$ ($0,1 \leq \eta \leq 0,3$) выражение (7) принимает вид $2h^* / r_e \leq \sqrt{a / r_e}$, где $C = \text{const}$. Для монокристалла Fe постоянные для плоского деформированного $C_{Fe} = 5,71$ и напряженного $C_{Fe} = 6,29$ состояния при отсутствии вакансий ($k=n=1$). Коэффициент Пуассона монокристалла Fe принят равным коэффициенту Пуассона технических сплавов Fe, т.е. $\mu = 0,3$.

На рис. 6 представлены зависимости, характеризующая поведение системы.

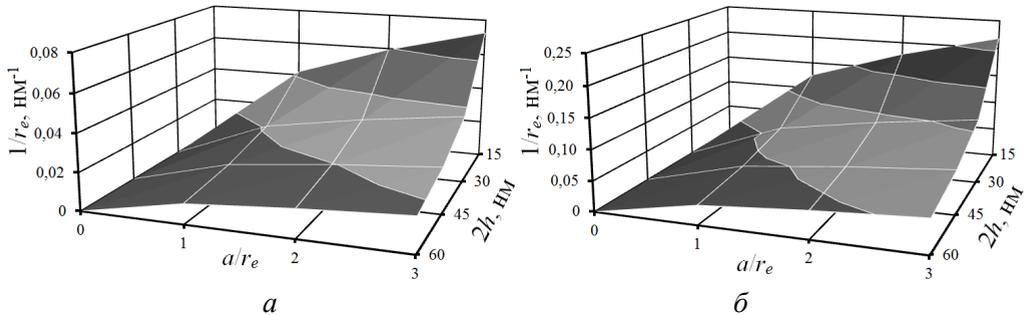


Рис. 6. Зависимости, характеризующие поведение системы в устойчивой (ниже поверхности) и неустойчивой областях (выше поверхности) при различных толщинах клина: $a - \eta = 0,1$; $\bar{b} - \eta = 0,3$

Поверхности на рис. 6, полученные для уравнения $1/r_e \leq (C\eta\sqrt{a/r_e})/2h$ при $\eta = 0,1; 0,3$, соответственно, отделяют области устойчивости (ниже поверхности) от областей неустойчивости. Остановимся на некоторых точках, характеризующих поведение монокристалла Fe при наличии молекулярного клина. Если точка с координатами $(a_0/r_e, 1/r_e, 2h)$ на плоскости попадает в область устойчивости, то рост трещины не происходит. Если точка с координатами $(a_0/r_e, 1/r_e, 2h)$ на плоскости попадает в область неустойчивости, то трещина увеличивается на одно межатомное расстояние r_e . Пусть точка с координатами $(a_0/r_e, 1/r_e, 2h)$ попадает в область неустойчивости (см. рис. 6). После увеличения трещины изменяется величина $a_0 + r_e$, характеризующая рассто-

яние от конца клина до новой вершины трещины (ПАВ реагирует с вновь образованными поверхностями монокристалла с некоторым запозданием). В дальнейшем анализируется поведение системы в точке с координатами $((a_0/r_e)/r_e, 1/r_e, 2h)$ и т. д.

Пусть ПАВ, поступающее в трещину, реагирует с вновь образованными поверхностями монокристалла. Если принимать во внимание химическую реакцию ПАВ с атомами монокристалла в окрестности вершины трещины, то величина $a_0 + r_e$ уменьшается, и конец клина продвигается к вершине трещины.

Очевидно, что для достаточно толстого клина всегда имеет место продвижение трещины при фиксированном расстоянии от конца клина до вершины трещины, однако без учета химической реакции ПАВ с вновь образованными поверхностями всегда наблюдается остановка трещины из-за увеличения указанного расстояния.

Расчеты для монокристалла Fe показывают, что из точек с координатами $(a_0/r_e, 1/r_e, 2h) = (1; 0,12; 15), (2; 0,12; 15), (1; 0,24; 15), (2; 0,24; 15)$ две точки с координатами $(1; 0,12; 15), (2; 0,12; 15)$ попадают в область устойчивости при $\eta = 0,3$ (см. рис. 6, б). При малых расстояниях от конца клина до вершины трещины ($a_0/r_e \leq 2$) для молекулярных клиньев FeH₂, состоящих из более чем двух рядов молекул, всегда имеет место разрушение.

Выводы. Таким образом, на основании метода конечно-элементного моделирования произведена оценка напряженно-деформированного состояния сплошных тормозных дисков, исходя из их энергонаруженности в процессе торможения с учетом нанопроцессов происходящих в окрестностях вершин микротрещин.

Список литературы

1. Возный А. В. Дисково-колодочный тормоз с принудительным охлаждением типа «вихревая труба»: конструкция, теория и расчет / А. В. Возный // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – №4 (69). – 2015. – С. 51–57.
2. Федосеев В. Н. Методы и средства рационального проектирования типоразмерных рядов фрикционных пар тормозных устройств повторно-кратковременного режима работы: дисс. докт. техн. наук: 05.02.04 / Федосеев Вячеслав Николаевич. – М., 1997. – 360с.
3. Корнев В. М. Самопроизвольное разрушение твердых тел при воздействии поверхностно-активных веществ / В. М. Корнев // Приклад. механ. и техн. физика. – Том 42, №2. – 2001. – С. 1–5.
4. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: Справочник / М. М. Антонова. Киев: Наук. думка, 1975.
5. Саврук М. П. Механика разрушения и прочность материалов: в 4 т. Том 2. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврук. Киев: Наук. думка, 1988. – С. 63–75.
6. Корнев В. М. Снижение прочности металлов при хемосорбции водорода в вершине трения / В. М. Корнев // ПМТФ, Том 39, №3. – 1998. – С. 173–178.
7. Макмилан Н. Идеальная прочность твердых тел / Н. Макмилан. Атомистика разрушения: Сб. ст. 1983-1985г.г. // Сост. А. Ю. Ишлинский. М.: Мир, 1987. С. 35–103.

A. B. ВОЗНИЙ

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛЕВОГО
ФРИКЦІЙНОГО ЕЛЕМЕНТУ ДИСКОВО-КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА
(ЧАСТИНА ДРУГА)**

Проілюстровано напружено-деформований стан суцільного диску в процесі гальмування, а також між гальмуваннями з виникненням і розвитком мікротріщин на його поверхнях.

Ключові слова: дисково-колодке гальмо, гальмівний диск, бігова доріжка тертя, напружено-деформований стан диска, мікротріщина, ansys workbench.

A. V. VOZNYI

**THE DEFLECTED MODE OF METAL FRICTION ELEMENT
OF DISC BRAKE (PAR TWO)**

We've illustrated the deflected mode of solid rotor during braking and braking between the emergence and development of cracks on its surfaces. There were the following questions: features of the method of finite element modeling of the stress state of the metal friction elements by using «Ansys Workbench»; the deflected mode of the brake discs; the deflected mode in the vicinity of the vertex of microcracks.

Keywords: disc brake, rotor, friction treadmill, deflected mode of rotor, microcracks, ansys workbench.

Возный Андрей Владимирович – канд. техн. наук, научний сотрудник Научно-исследовательского института нефтегазовой энергетики и экологии, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 03422 4 51 14, факс: +38 03422 4 00 89, E-mail: anarkil@i.ua.