

УДК 621.891

А. И. ВОЛЬЧЕНКО¹, М. В. КИНДРАЧУК², Д. А. ВОЛЬЧЕНКО¹,
Н. А. ВОЛЬЧЕНКО³, В. С. ВИТВИЦКИЙ¹

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

²Национальный авиационный университет, Украина

³Кубанский государственный технологический университет, Россия

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ МНОГООЧАГОВОМ ЗАРОЖДЕНИИ И РАЗВИТИИ МИКРОТРЕЩИН В ТОРМОЗНЫХ ШКИВАХ БУРОВЫХ ЛЕБЕДОК

Проиллюстрировано напряженно-деформированное состояние при многоочаговом зарождении и развитии микротрещин в тормозных шкивах, исходя из анализа факторов и их распространения, действующих на рабочую поверхность ободов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, напряжения: механические, температурные, остаточное, от концентраторов; элементы тормозного шкива, рабочая поверхность обода; многоочаговое зарождение и развитие микротрещин

Введение. Явления, происходящие при разрушении и развитии микротрещин на рабочей поверхности обода шкива, ведущие к ее разрушению, под действием генерируемых электрических и тепловых токов импульсного и длительного характера, аккумулируемых в слоях обода шкива тепловую энергию способствуют возникновению высоких температур, и как следствие, температурных градиентов, как поверхностных, так и глубинных, а также постоянно действующих механических напряжений в процессе торможения, а также напряжений от концентраторов, заложенных в конструкцию тормозного шкива при его производстве при замкнутых и разомкнутых парах трения ленточно-колодочного тормоза. На процессы развития микротрещин на рабочей поверхности обода шкива оказывает влияние попадание поверхностного слоя фрикционной накладки в зону выше допустимой температуры для ее материалов. Кроме того, немаловажную роль играет кинетика состояния рабочей поверхности обода шкива при фрикционном взаимодействии пар трения с позиций фракталов. При этом необходимо также учитывать напряженное состояние в окрестностях вершин микротрещин. Поэтому задача учета механических и термических напряжений не является просто задачей термочности. Она представляет собой комплексную задачу электрической и тепловой динамики трения и прочности. При этом необходимо заметить, что наибольшее влияние на разрушение рабочей поверхности обода шкива оказывают электрические и тепловые токи при электротермомеханическом трении металлополимерных пар трения тормоза. Это обстоятельство должно быть учтено при выборе материалов для реального узла трения.

Основная часть возникающих напряжений сосредоточена в поверхностных и подповерхностных слоях рабочей поверхности обода тормозного шкива, которые и влияют на ее разрушение [1].

Состояние проблемы. В работах [1; 2] осуществлено обоснование зарождения и развития микротрещин на рабочей поверхности обода тормозного шкива, исходя из трех стадий их протекания:

– образование сетки трещин на фрикционной поверхности взаимодействия за счет электрических и тепловых токов, сопровождающихся их электрическими и тепловыми разрядами, поверхностными температурными градиентами по ширине обода шкива, процессами термоэлектростимулированной и электростимулированной поляризации и деполяризации пятен контактов микровыступов пар трения;

– рост трещин по длине и вглубь, а также слияние некоторых из них в рабочих слоях обода шкива под действием ослабевающих переменных удельных нагрузок, вызывающими пластические деформации поверхностных и подповерхностных слоев обода, а также на них температурных градиентов, вызванных аperiodическим протеканием процессов нагрева и вынужденного охлаждения поверхностных и подповерхностных слоев с неодинаковым поперечным сечением по периметру обода шкива;

– хрупкий разрыв обода шкива, происходящий, как правило, при больших термических напряжениях, развивающихся при положительных или отрицательных температурах окружающего воздуха, а механический разрыв – при 50-60%-ом износе от допустимой величины рабочей поверхности обода.

Однако в материалах данных публикаций не был реализован комплексный подход к оценке напряженно-деформированного состояния при многоочаговом зарождении и развитии микротрещин.

Электрическое разрушение тонких полимерных пленок накладок рассмотрено в работе [3]. Исследовались пленки толщиной 200–400 нм. Пробой тонких пленок полимеров различных типов происходит в полях с напряженностью $(2-6) \cdot 10^6$ В/см за счет генерирования объемного заряда в течении времени $(10^{-8}-10^{-7})$ с. Такой мощный разряд пробоя полимерной пленки оказывает влияние на металлические пленки обода тормозного шкива, способствуя возникновению в них микротрещин.

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

- оценить кинетику состояния рабочей поверхности металлического элемента при фрикционном взаимодействии с позиций фракталов;
- выполнить углубленный анализ многоочагового зарождения и развития микротрещин в ободке тормозного шкива;
- установить закономерности изменения напряженного состояния тормозного шкива.

Цель работы. Обосновать комплексный подход к оценке напряженно-деформированного состояния при многоочаговом зарождении и развитии микротрещин в тормозных шкивах буровых лебедок.

Концентраторы напряжений. В большинстве случаев усталостное разрушение возникает в местах концентрации напряжений, появляющихся как результат неправильной конструкции тормозного шкива, а также из-за нарушения технологии его производства. Кроме того, сильными концентраторами напряжений являются микротрещины на рабочей поверхности обода тормозного шкива. Поэтому при конструировании деталей и узлов нефтегазового оборудования, подверженных действию переменных динамических нагрузок, следует стремиться избегать таких элементов конструкции тормозного шкива, как сопряжение его обода со стороны рабочей поверхности с ребордами, а также сопряжение нерабочей поверхности обода шкива с крепежным выступом, смещенным от се-

редини обода в сторону його заземлення (рис. 1). Такое конструктивное решение способствует возникновению изгибающих (растягивающих) напряжений, действующих за крепежным выступом в направлении свободного края обода, вызывая тем самым момент напряжений изгиба.

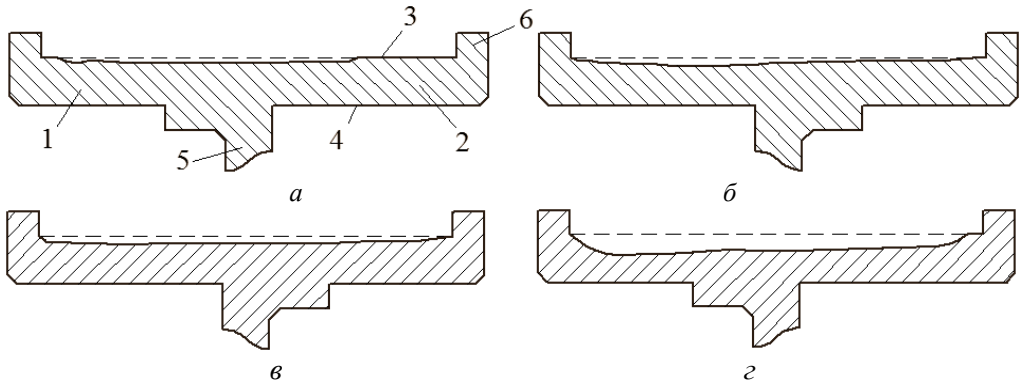


Рис. 1. Износ рабочих поверхностей ободов левых (а, в) и правых (б, г) тормозных шкивов в зависимости от стороны закрепления их краев: 1, 2 – заземленный и свободный край обода; 3, 4 – рабочая и нерабочая поверхности обода; 5 – крепежный выступ; 6 – реборды

Система нагружения. Система нагружения металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза носит импульсный характер из-за фрикционного взаимодействия их микровыступов. Промышленные испытания пар трения тормоза на энергонагруженность проходят под воздействием импульсного нормального усилия и силы трения. Возникающая при этом усталость поверхностных и приповерхностных слоев обода тормозного шкива испытывают по принципу суперпозиции «растяжение-сжатие» (радиальное) и «продольный сдвиг-поперечных сдвиг» их деформации, и как следствие, возникают аналогичные напряжения.



Рис. 2. Типичная σ - N – кривая для стали 35ХНЛ

Растягивающие напряжения, наложенные на поверхностный слой при условии его «сжатия-расширения-сжатия», понижают сопротивление усталости, а сжимающее напряжения ее повышают. Таким образом, влияние увеличения среднего растягивающего напряжения состоит в смещении σ - N – кривой в сторону более низких механических напряжений, а увеличение среднего сжимающего напряжения приводит к сдвигу этой кривой в обратном направлении (рис. 2).

Учитывая тот факт, что усталостное разрушение начинается на рабочей поверхности обода шкива, следует ожидать, что наложение остаточного сжимающего напряжения после завершения фрикционного взаимодействия будет способствовать благоприятному эффекту, заключающегося в торможении процесса раскрытия микротрещины. Этим объясняется факт повышения сопротивления усталости поверхностного слоя материалов обода шкива в результате действия импульсов электрических и тепловых токов в процессе фрикционного взаимодействия пар трения. Обратный эффект средне-

го растягивающего напряжения поверхностного слоя можно понять, если учесть, что оно способствует раскрытию усталостной микротрещины и, следовательно, ускоряет разрушение.

Механические напряжения. Поведение стали 35ХНЛ, из которой изготовлен обод тормозного шкива, подверженной усталости лучше всего изучать методом многократного аperiodического нагружения рабочей поверхности обода шкива переменными нормальными усилиями в процессах фрикционного взаимодействия микровыступов пар трения «шкив-накладка». Количество циклов нагружения пар трения тормоза оценивается по методике, приведенной в работе [4]. По результатам промышленных испытаний пар трения ленточно-колодочного тормоза строится графическая зависимость уровня максимального напряжения от логарифма количества циклов до разрушения, получая так называемую $\sigma-N$ – кривую (см. рис. 2). Для стали 35ХНЛ характерен ярко выраженный горизонтальный участок на кривой усталости; при напряжениях ниже этого уровня разрушение рабочей поверхности обода шкива не наступит даже при продолжительных испытаниях; напряжение, соответствующее горизонтальному участку кривой, называемой пределом усталости.

Влияние амплитуды механических напряжений отражается на характерном виде зависимости $\sigma = f(N)$ (где σ – напряжения; N – логарифм числа циклов нагружения), являющейся наиболее важным параметром. Обод тормозного шкива (сталь 35ХНЛ) может работать под действием удельных нагрузок, и как следствие, механических напряжений, называемого пределом усталости, однако последний существенно меньше предела упругости. Сильное влияние на практике наблюдается от поверхностной температуры рабочей поверхности обода шкива на форму $\sigma-N$ – кривой.

Предел усталости существенно меньше предела упругости; например сталь 35ХНЛ с нижним пределом текучести 490МПа имеет предел усталости 311 МПа. Это подтверждает истину о том, что движение дислокаций наблюдается много ниже той точки на кривой «деформация-напряжение», которая соответствует макроскопическому началу пластической деформации.

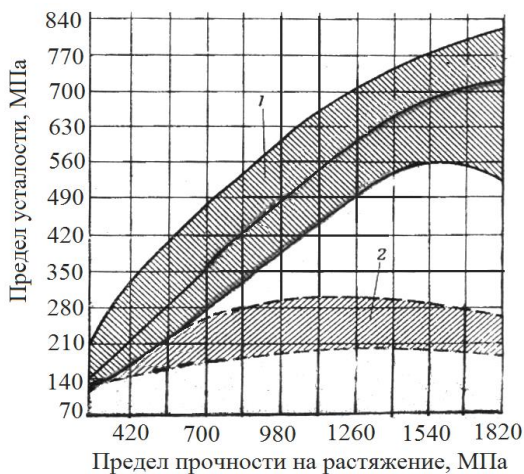


Рис. 3. Зависимость между пределом усталости и пределом прочности на растяжение сталей: 1, 2 – образцы: без и с трещинами

Предел усталости стали 35ХНЛ существенно изменяется в зависимости от режима нагружения пар трения ленточно-колодочного тормоза, т.е. количества свечей опускаемых в скважину, и, как следствие, энергонагруженности рабочей поверхности обода. Известно, что имеется приблизительная связь между пределом усталости и пределом прочности на растяжение (рис. 3). Среднее значение отношения предела усталости к пределу прочности на растяжение равно приблизительно 0,5; последняя величина весьма чувствительная применительно к качеству рабочей поверхности обода тормозного шкива, а также к тому,

існують на ній риски і царапины. Для мартенситних і ферритних сталей, указане співвідношення може досягати відповідно, 0,25 і 0,6.

На рис. 4 приведені закономірності змінення змінного напруження (спротивлення усталості) від остроти тріщин на образцях, вирізаних із обо- двох тормозного шків [2], при різних поверхневих температурах.

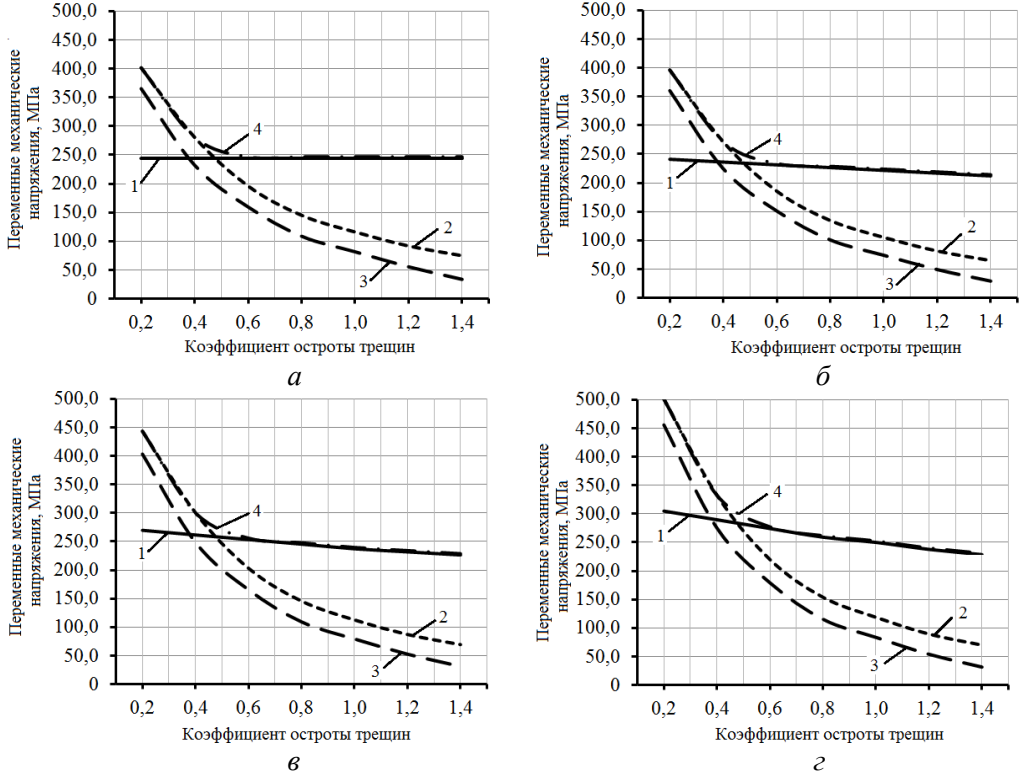


Рис. 4. Зависимость сопротивления усталости от остроты трещин при разных поверхностных температурах (а – $t = 22^{\circ}\text{C}$; б – $t = 100^{\circ}\text{C}$; в – $t = 200^{\circ}\text{C}$; г – $t = 300^{\circ}\text{C}$;) на образцах стали: 1, 2 – напряжения, необходимые для: распространения и возникновения трещин; 3, 4 – теоретическая и стандартная кривая предела усталости

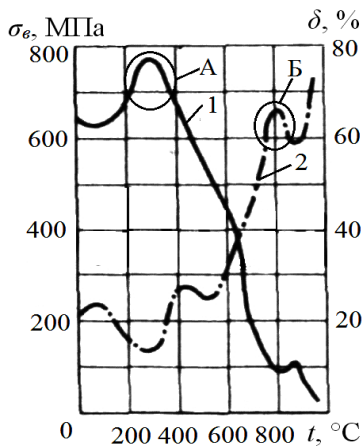


Рис. 5. Влияние температуры на предел прочности σ_s (кривая 1) и относительное удлинение δ (кривая 2) стали

Кривые 2 показывают напряжения, необходимые для зарождения микротрещин, а кривые 1 – напряжения обеспечивающие их распространение. При этом с увеличением поверхностной температуры увеличивается составляющая температурных напряжений, и как следствие, суммарные (механические + температурные) напряжения. Нераспространение трещин в данном случае находится в области ограниченной кривыми 1 и 2, справа от вертикальной линии.

На рис. 5 проиллюстрированы закономерности влияния поверхностной температуры на предел прочности σ_s (кривая 1) и относительное

удлинение δ (кривая 2) стали из которого следует, что указанные параметры находятся в обратно пропорциональной зависимости от поверхностной температуры. Необходимо обратить внимание на «горбы» А и Б, отвечающие кривым 1 и 2, при больших величинах $\sigma_0 = (700-775)$ МПа и температуре, изменяющейся от 200 до 400°C, а также при высокой температуре (800°C) и относительном удлинении больше 60%. В указанных интервалах изменения параметров возможна их квазистабильзация.

Электрические и тепловые токи. При фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов пар трения тормозов происходит изменение их площадей. При этом дискретные контакты имеют переменное электротермическое сопротивление с различной энергетической активностью микро- конденсаторов и термобатарей, обладающими возможностью мгновенного их переключения при изменении площадей пятен контактов микровыступов. При соблюдении условий на первой стадии фрикционного взаимодействия ($A_{\phi} < A_n$), исходя из того, что фактическая площадь контактирования (A_{ϕ}) мала по сравнению с номинальной (A_n) и при этом производится суммирование составляющих генерируемых токов, носящих импульсный и волновой характер. После чего при условии $A_{\phi} = A_n$ развивается трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентом механических свойств поверхностного слоя обода шкива. В дальнейшем под воздействием механических, электрических и тепловых полей импульсного характера в поверхностном слое, образованного из пятен контактов микровыступов, происходит разрушение тонких пленок вторичных структур, а их поверхности при этом подвержены механическому и термическому искажению при высоких волнах текущих напряжений, в состав которых входят суммарные механические напряжения (от концентраторов напряжений и удельных нагрузок) и остаточные термические напряжения. При этом на пленки вторичных структур действуют электрические и тепловые токи различной интенсивности, ослабляющие тем самым поверхностный слой; одновременно по поверхности и в подповерхностных слоях металлического фрикционного элемента формируются по его длине и толщине переменные температурные градиенты, способствующие аperiodическим циклическим процессам «расширение (охлаждение) – сжатие (нагревание)», вызывающим нарушение теплового равновесия, и как следствие, образование сетки микротрещин в виде фрактальной структуры, состоящей из многоугольников, т.е. слившихся треугольников с различными площадями поверхностей на участках концентрации термонапряжений и минимальных по толщине поперечных сечениях подповерхностного слоя металлического фрикционного элемента.

С повышением поверхностной температуры обода шкива при фрикционном взаимодействии пар трения тормоза $\sigma-N$ – кривая сдвигается в сторону более высоких суммарных напряжений, но форма ее почти не претерпевает изменений.

Влияние физико-химических процессов. В эксплуатационных условиях микротрещины возникают на рабочей поверхности обода и зависят как от ее состояния, физико-химических процессов происходящих на площадях пятен контактов, а также от влияния окружающей среды в интервалах времени между торможениями.

Влияние электро- и тепловых токов при электротермическом трении на процессы переноса в металлополимерных парах трения «металл-полимер» позволило объяснить процесс наводораживания металла, вызывающего, как извест-

но, охрупчивание и диспергирование деформируемого трением слоя. Водород выделяется при активации электромеханическим трением реакций дегидрогенизации углеводородов поверхностного слоя полимерных накладок, его поставщиком являются продукты термодеструкции органического связующего (например различные смолы), а также попаданием влаги на рабочую поверхность металлического фрикционного элемента в трибологической системе. При возникновении молекулы водорода из двух атомов обе их $1s$ – орбиты объединяются с образованием молекулярной орбиты, которая занята двумя электронами с противоположными спинами и охватывает оба ядра (рис. 6)

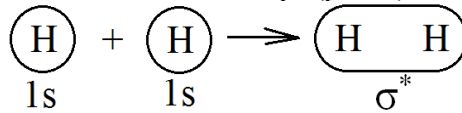


Рис. 6. Схема возникновения молекулы водорода из двух атомов

Эта орбита симметрична относительно прямой, связывающей оба ядра, и называется σ (сигма) – молекулярной орбитой. Энергия молекулярной орбиты минимальна, и, следовательно, энергия связи максимальна в том случае, когда составляющие атомные орбиты перекрываются в наибольшей степени, так как перекрывание облегчает обмен электроном. Две s -орбиты проявляют большую склонность к взаимному перекрыванию, поэтому ковалентная связь (σ^* -связь) в молекуле водорода очень устойчива. Диффузионный поток водорода, формируемый на рабочей поверхности стального фрикционного элемента, направляется в область с максимальной локальной температурой, расположенной на некоторой глубине от поверхности трения (смещение зоны с максимальной температурой под названием «температурного ножа», впервые было теоретически обосновано В. А. Кудиновым), где водород хорошо растворяется. Согласно происходящим процессам, водород, поглощенный металлом, способен диссоциировать, причем именно уникально малый размер протона ($1 \cdot 10^{-13}$ см) и его противоположный заряд по отношению к металлу помогают ему довольно легко проникать в решетку. В этом, в частности, и проявляется участие электризации трением в наводораживании поверхности стали

Кинетика состояния рабочей поверхности металлополимерного элемента при фрикционном взаимодействии с позиций фракталов. Оценка кинетики рабочей поверхности металлического элемента при фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов пар трения с позиций фрактального подхода завоевывает все большее место в трибологии. Особое место уделено фрактальному подходу в работе [5] академика А. Х. Джанахмедова.

Особый интерес представляет изучение и применение теории сильно возбужденных состояний в кристаллах металлического фрикционного элемента пластичности и прочности его поверхностных и подповерхностных слоев. При этом пластическая деформация (напряжения) должны рассматриваться с соблюдением законов поведения неоднородных, сильно неравновесных систем, претерпевающих локально-структурные превращения и следующих к равновесию путем движения составляющих новых структур по кристаллу под действием градиентных напряжений. При этом деформируемый кристалл способен осуществлять в локальных объемах пластическое течение, протекающее как диссипативный процесс, за счет эстафетной перестройки между двумя смежными структурами.

Генерирование энтропии в рассматриваемой зоне кристалла является локальным кинетическим структурным переходом, способствующему зарождению пластического сдвига.

Отмеченное структурное превращение отличается от термодинамического структурного перехода и должно отвечать неравновесной термодинамике, являющейся составляющей неравновесной трибологии при фрикционном взаимодействии пар трения тормозных устройств. При этом в каждой точке деформируемых пятен контактов микровыступов в заданный момент времени осуществляется только по одной системе плоскостей скольжения, в которой происходит потеря сдвиговой устойчивости.

Сдвиговая информация, носящая характер анизотропной, всегда сопровождается материальным поворотом внутри структурного элемента деформации (зерна блока, ячейки дислокационной структуры и т.д.). При этом материальный поворот в отличие от кристаллографического не влияет на пространственную ориентацию кристаллической решетки [5]. Это, в свою очередь, со стороны окружающего материала на границе структурного элемента деформации вызывает поворотный момент. Поворотные моды (одна из численных характеристик распределения вероятности случайной величины, оцениваемая их плотностью) деформации приводит в движение всю иерархическую структуру уровней деформируемых пятен контактов микровыступов. Структурные элементы начинают двигаться как целое, испытывая трансляцию (передачу) и кристаллографический поворот. Поворотные моды деформации формируют поле поворотных моментов и обеспечивают внутри структурного элемента деформации выхода дислокаций из своих плоскостей скольжения, что вызывает розориентирование ячеистой дислокационной субструктуры с последовательным вовлечением множественного скольжения пятен контактов микровыступов как вихря материальных поворотов кристаллографических сдвигов на цилиндрической поверхности. Взаимосвязь сдвигов и поворотов показывает, что элементарным актом пластической деформации является не сдвиг, а трансляционно-ротационный вихрь. Последний по своему масштабу может быть на мезо, микро и макроуровнях. Иерархия вихрей возникает за счет формируемой иерархии различных структурных уровней деформаций. Движение всей иерархии структурных уровней деформации и вызывает ее вихревой характер, способствуя при этом возникновению новых каналов диссипации энергии, более эффективных, чем от движения отдельных дислокаций.

Поворотные моды деформации на различных масштабных уровнях отличаются друг от друга. Их эволюция при увеличении степени деформации закономерно отражается в изменении фрактальной размерности в местах присутствия концентраторов механических напряжений на поверхности металлического фрикционного элемента.

Гипотеза трансляционно-ротационного вихря применительно к структурным уровням деформируемых материалов пятен контактов микровыступов связана с энергетическими уровнями самого его ядра в котором градиенты температуры увеличиваются по сечению ядра к периферийным слоям, и, следовательно, температурные напряжения. Что касается механических деформаций то они уменьшаются в сторону центра ядра, и следовательно, и возникающих поворотных моментов. Изменение перечисленных выше градиентов и является движущим фактором трансляционно-ротационных вихрей, возникающих на структур-

ных уровнях деформируемых материалов пятен контактов микровыступов металлического фрикционного элемента.

Напряженно-деформируемое состояние тормозного шкива. Обод с крепежным выступом можно представить как консольную балку в связи с тем, что распределение удельных нагрузок на рабочей поверхности носит неравномерный характер. Не обязательно создавать механические напряжения в дном сечении обода, а можно в слоях обода, находящихся близко один от одного.

Для исследования механических и тепловых напряжений, а также их градиентов использовался метод конечно-элементного моделирования с помощью программы Ansys Workbench, в которой моделировался фрикционный узел «накладка-шкив» со следующими исходными конструктивными и динамическими параметрами: материал обода шкива – сталь 35ХНЛ, удельная нагрузка составляла $p = 1,2 \text{ МПа}$, поверхностная температура $t_n = 390^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $t_0 = 22^\circ\text{C}$.

При рассмотрении нагружения обода шкива только удельными нагрузками (рис. 7) то наблюдается следующая картина. Максимальные механические напряжения (зона I, рис. 7, б) возникают в точках отвечающим местам сопряжения нерабочей поверхности обода с крепежным выступом и составляют соответственно 120,5 и 133,6 МПа.

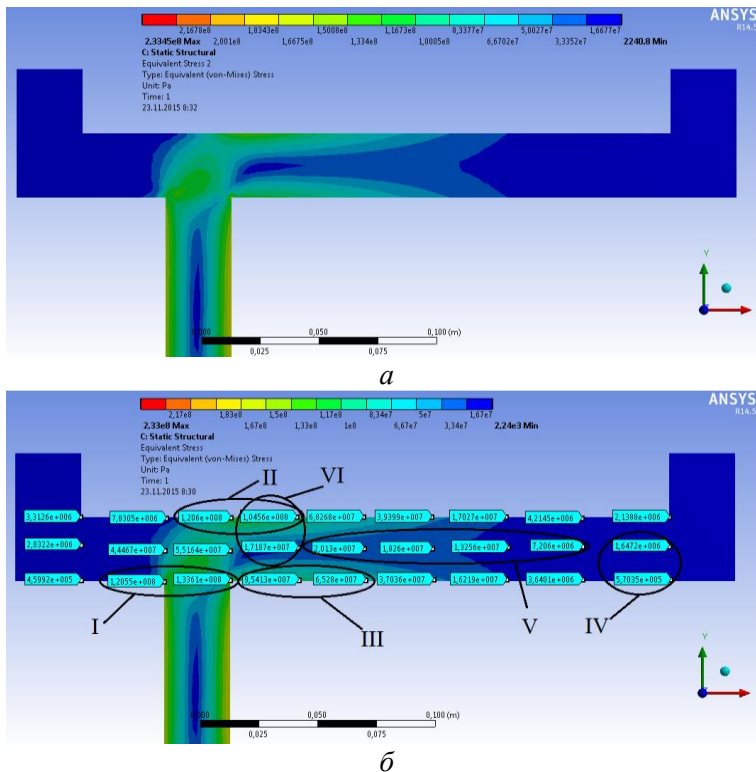


Рис. 7. Механические напряжения в элементах тормозного шкива (а) и их распределение в его теле в различных зонах (б)

Если рассматривать только поверхностный слой обода, то в зоне II наблюдаются максимальные поверхностные напряжения обода шкива (120,6–104,56 МПа), вызванные его растягивающими усилиями. С другой стороны, на нерабочей по-

верхности, правее крепежного выступа (зона III) также наблюдаются большие напряжения (95,4–65,27 МПа), возникающие под действием изгибающих моментов из-за сжатия этих слоев, и они уменьшаются в сторону правой реборды, возле которой наблюдаются минимальные механические напряжения 0,57 МПа (зона IV). Следует отметить, что в средней части обода шкива (зона V) напряжения являются меньшими чем в поверхностном слое рабочей и нерабочей поверхности. Что касается объемных градиентов напряжения, то в зоне VI они являются максимальными и составляют 6,19 МПа/мм, что объясняет зарождение и развитие в этой области микротрещин. Минимальные объемные механические напряжения наблюдаются в IV зоне возле правой реборды, и составляют 0,036 МПа/мм.

При рассмотрении нагружения обода шкива только от действия поверхностной температуры (рис. 8) наблюдается следующая картина. В зонах I' и II' (рис. 8, б), возле правой и левой реборды наблюдаются максимальные температурные напряжения, которые равны соответственно 169,37 и 146,87 МПа.

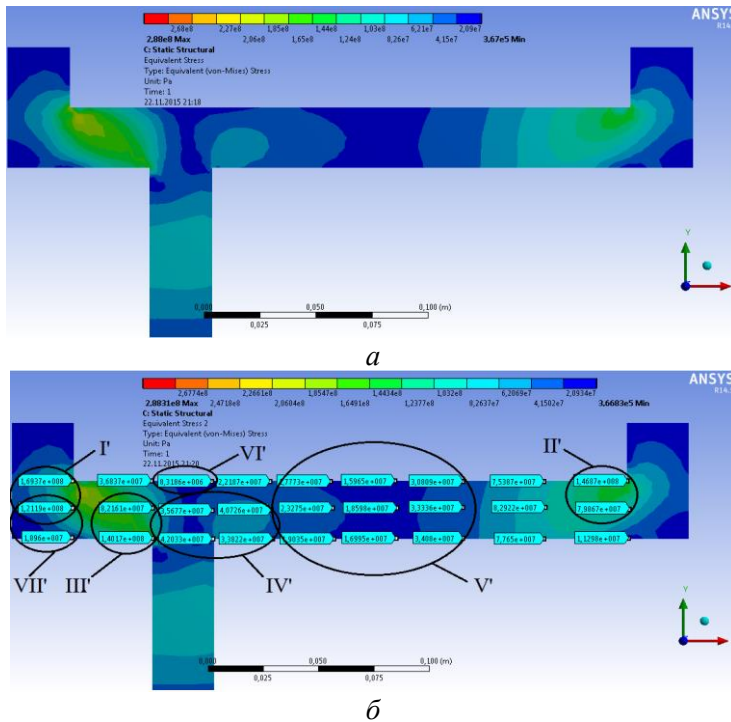


Рис. 8. Температурные напряжения в элементах тормозного шкива (а) и их распределение в его теле в различных местах (б)

Объясняется это тем, что в этих зонах есть концентраторы термических напряжений, поскольку, как известно, при воздействии температуры на материал, он расширяется. Поскольку места сопряжения нерабочей поверхности обода шкива с крепежным выступом также является концентраторами напряжений, то зоны III' и IV' также характеризуется большими температурными напряжениями (42,03-140,02 МПа). В следствии сливания I и III зоны образовывается большая зона температурных напряжений. Следует отметить, что в средней части обода шкива (зона V') при воздействии температуры, в отличие от картины при воздействии от удельных нагрузок, развиваются небольшие напряжения (16,96-

34,08 МПа). В зоні VI', над крепежним выступом в приповерхностних слоях рабочей поверхности обода шкива возникают минимальные термические напряжения, составляющие всего 8,32 МПа. Что касается объемных градиентов напряжений, то максимальное его значение равно 7,3 МПа/мм, и находится ниже срединных слоев обода шкива (зона VII'). Минимальные объемные градиенты наблюдаются в зоне V' в правой ее части и также ниже срединных слоев обода шкива, и составляют 0,053 МПа/мм.

Если же рассматривать более реальную ситуацию при фрикционном взаимодействии накладки со шкивом, а именно совместное действие удельной нагрузки и возникновение поверхностных температур, то стоит отметить следующее. Как видно из рис. 9 а и б механические и температурные напряжения накладываются друг на друга и подпитываются друг другом. В зоне I'' и II'' наблюдаются максимальные напряжения (143,36-202,48 МПа), вызванные действием теплоты в местах концентратора напряжений (в местах сопряжения с крепежным выступом и ребрами). В приповерхностных слоях рабочей поверхности над крепежным выступом (от их растяжения) и вглубь толщины обода шкива (зона III'') наблюдается зона больших напряжений (91,86-125,92 МПа), которые образовались от действия удельных нагрузок. Опять же в этой зоне зарождаются и развиваются микротрещины. Следует отметить, что в средних слоях обода шкива (зона IV'') напряжение меньше, чем в приповерхностных его слоях. Максимальный объемный градиент напряжений наблюдается в правой части зоны I'' возле точки крепления с крепежным выступом, и составляет 10,04 МПа/мм. Минимальный объемный градиент наблюдался в левой части зоны II'', составляющий 0,23 МПа/мм.

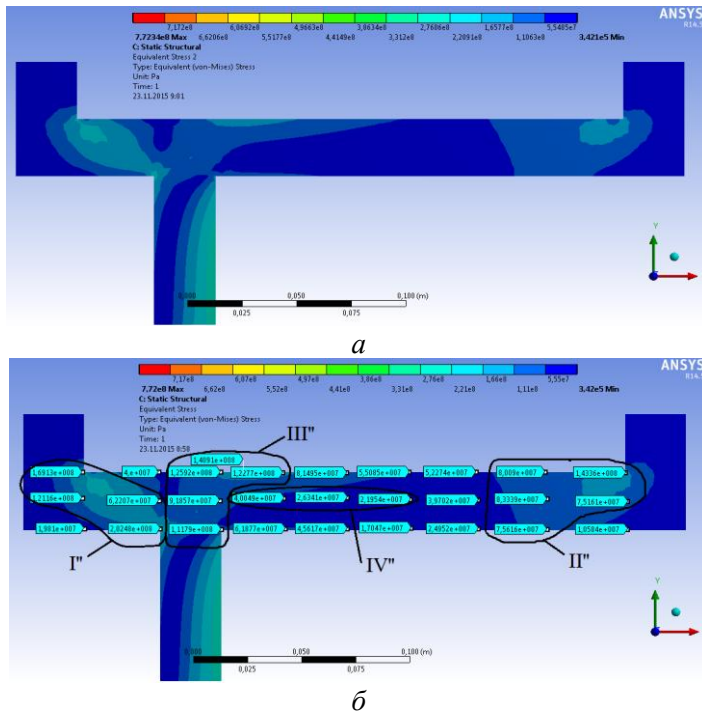


Рис. 9. Механическое и тепловое воздействие на элементы тормозного шкива (а) и суммарные (механические и тепловые напряжения) и x распределение в теле его обода в различных зонах (б)

В ряде случаев для оценки сопротивления разрушению помимо коэффициента концентрации напряжений (деформаций) используют градиент напряжений (деформаций) (табл. 1).

Таблица 1

Величины градиентов напряжений в характерных точках тормозного шкива

Напряжения от действия:		Градиенты напряжений, МПа/мм:	
		объемные	поверхностные
удельной нагрузки;	min	$1,08/14 = 0,036$	$2,09/25 = 0,08$
	max	$86,7/14 = 6,19$	$112,7/25 = 4,51$
температуры;	min	$0,74/14 = 0,053$	$1,8/25 = 0,072$
	max	$102,2/14 = 7,3$	$132,6/25 = 5,3$
общие	min	$3,24/14 = 0,23$	$0,28/25 = 0,011$
	max	$140,5/14 = 10,04$	$129,1/25 = 5,16$

При рассмотрении прикладных задач, касающихся трущихся сопряжений металлополимерных пар трения тормозных устройств, необходимо учитывать «букет» полей, вызванных нагружением и роль сочетаний материалов при электротермомеханическом трении.

Выводы. Таким образом, установлены теоретические и экспериментальные закономерности изменения зарождения и развития микротрещин на рабочей поверхности обода тормозного шкива в зависимости от переменных градиентов механических и температурных напряжений от их концентраторов и кинетики фрактального подхода, что позволяет прогнозировать ресурс тормозного шкива на этапе его проектирования.

Список литературы

1. Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть первая) / Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, Э. А. Джанахмедов и др. // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – №2 (63). – 2014. – С. 30–50.
2. Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть вторая) / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев и др. // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – №3 (64). – 2014. – С. 4–15.
3. Закревский В. А. Электрическое разрушение тонких полимерных пленок / В. А. Закревский, Н. Т. Сударь // Физика твердого тела, Т.47, вып. 5, 2005. – С. 931–936.
4. Возний А. В. Контактно-імпульсна та контактна фрикційна взаємодія металополімерних пар тертя: дис. ... канд. техн. наук. / Возний Андрій Володимирович. – Київ: НАУ, 2015. – 270 с.
5. Джанахмедов А.Х. Синергетика и фракталы в трибологии / А.Х. Джанахмедов, О.А. Дышин, М.Я. Джавадов // Баку: Апостроф, 2014. – 504 с.

О. І. ВОЛЬЧЕНКО, М. В. КИДРАЧУК, Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, М. О. ВОЛЬЧЕНКО, В. С. ВИТВИЦЬКИЙ

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПРИ БАГАТООСЕРЕДКОВОМУ ЗАРОДЖЕННІ І РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН В ГАЛЬМІВНИХ ШКІВАХ БУРОВИХ ЛЕБІДОК

Проілюстровано напружено-деформований стан при багатоосередковому зародженні і розвитку мікротріщин в гальмівних шківках, виходячи з аналізу факторів і поширення фракталів, що діють на робочу поверхню їх ободів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, напруження: механічні, температурні, залишкові, від концентраторів; елементи гальмівного шківка, робоча поверхня обода; багатоосередкове зародження і розвиток мікротріщин.

*A. I. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, D. A. VOLCHENKO,
N. A. VOLCHENKO, V. S. VITVITSKY*

THE DEFORMATION MODE OF THE BRAKE PULLEYS OF THE DRAW-WORKS AT MULTICELLS ORIGIN AND DEVELOPMENT OF MICROCRACKS

We've Illustrated the deformation mode of the brake pulleys of the draw-works at multicells origin and development of microcracks, based on the analysis of factors and dissemination of fractals, acting on the working surface of the rims. There were the following tasks: to evaluate the condition of the kinetic of the working surface of the metal element in the frictional interaction with the position of fractals; to perform analysis of multicells origin and development of microcracks in the rim of the brake pulley; to establish patterns of change in the stress state of the brake pulley.

Keywords: mode of deformation, stresses: mechanical, thermal, residual from hubs; the elements of brake pulley, working surface of the rim; multicells origin and development of microcracks.

Вольченко Александр Иванович – доктор техн. наук, профессор кафедры механики машин, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: mecmach@nung.edu.ua.

Кидрачук Мирослав Васильевич – доктор техн. наук, профессор, зав. кафедры машиноведения, Аэрокосмический институт, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058, тел.: +38 04440 6 74 10, E-mail: nau12@ukr.net.

Вольченко Дмитрий Александрович – доктор техн. наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, E-mail: vol21@ukr.net.

Вольченко Николай Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и автосервиса, Кубанский государственный технологический университет, ул. Красная, 135, ауд. К-51, г. Краснодар, Россия, 350004, тел.: +7861 255 99 26, E-mail: volchenko.nik@yandex.ru

Витвицкий Василий Степанович – аспирант кафедры механики машин, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: vytvytskyi.v.s@gmail.com.