

УДК 621.891

Д. А. ВОЛЬЧЕНКО¹, Н. А. ВОЛЬЧЕНКО², Э. А. ДЖАНАХМЕДОВ³,
М. В. КИНДРАЧУК⁴, А. В. ВОЗНЫЙ¹, С. П. КРАСИН²

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

²Кубанский государственный технологический университет, Россия

³Государственная нефтяная компания, Азербайджанская республика

⁴Национальный авиационный университет, Украина

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИЗНОС И РАЗРУШЕНИЕ ОБОДОВ ТОРМОЗНЫХ ШКИВОВ БУРОВЫХ ЛЕБЕДОК (часть первая)

Проиллюстрирована энергонагруженность и электротермомеханический износ рабочих поверхностей ободов тормозных шкивов буровых лебедок и раскрыта природа зарождения и развития трещин на поверхности и в подповерхностном слое обода тормозного шкива.

Ключевые слова: ленточно-колодочный тормоз, шкив с ободом, процессы нагревания и вынужденного охлаждения, электрические и тепловые токи, электротермомеханическое трение и износ, зарождение и развитие трещин, сжимающие, растягивающие и остаточные напряжения

Введение. Основным требованием, предъявляемым к фрикционным узлам ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, является ее надежность, обеспечивающая безопасность и безаварийность работ. Практика бурения скважин в зонах холодного и жаркого климата показала, что недостаточную надежность в тормозной системе буровых лебедок установок ближнего (HR-500, HR-5000; Уралмаш: 2500/160 ЭСК-БМ4; 3000 ЭУК; 3900/225 ЭК-6М; 5000/320 ЭК-БМ4 с параллельными эшелонами и др.) и дальнего зарубежья (типы лебедок фирм «National», «Oilwell», «Continental-Emcoo», «Mid-Continent», «Gardner-Denver») с диаметром рабочей поверхности обода шкива $D_{ш}=1070,0-1680,0$ мм и с шириной обода $b = 213,0-318,0$ мм изготовленные, например, из сталей 35Л, 35ХНЛ, 35ХМЛ и др., имеют ленточно-колодочные тормоза.

Так, например, исследования показали, что интенсивность разрушения шкивов из стали 35Л резко возрастает при температуре -20°C и ниже, а из стали 35ХНЛ – при -30°C и ниже. Завод-изготовитель рассматриваемых тормозных шкивов гарантирует их надежную работу при температуре -40°C . Однако Западная Сибирь (Россия) относится к зоне с холодным климатом, где оборудование должно сохранять работоспособность при температуре -60°C .

Явления, происходящие при разрушении рабочей поверхности обода шкива 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 напряжений на обод шкива при замкнутых и разомкнутых парах трения ленточно-колодочного. Поэтому задача учета термических напряжений не является просто задачей термпрочности. 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 электротермомеха-

ническом 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].

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

- механизм изнашивания при электротермомеханическом трении металлополимерных пар трения;
- формирование напряженного состояния обода шкива;
- аналитическое определение остаточных напряжений в ободке тормозного шкива;
- влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на напряженное состояние обода шкива;
- поверхностное разрушение при электротермомеханическом трении металлополимерных пар трения.

Цель работы: обосновать на наноуровне процессы износа, зарождения и развития трещин 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, вызывающих пластические деформации поверхностных и подповерхностных слоев обода, а также температурных градиентов на них, вызванных аperiodическим протеканием процессов нагревания 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.

Механизм изнашивания микровыступов металлополимерных пар трения и образование микротрещин на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. Большое количество факторов, влияющих на начало локального разрушения материалов пятен контактов микровыступов под влиянием термической усталости, не позволяет разработать универсальную экспериментальную методику, результаты которой были бы адекватны явлениям, имеющим место в действительных условиях. При анализе условий нагружения следует подвергать тщательной оценки термические условия работы металлополимерной пары трения: характер поверхностного градиента и в сечении подповерхностного слоя, теплопередачу, термическое расширение, а также длительность термических нагрузок и их цикличность.

В настоящее время термическую усталость описывают как процесс деформации, а также образования и увеличения структурных повреждений пятен кон-

тактов микровыступов под влиянием многократных изменением импульсных тепловых токов. При этом подразумевают, что термическая усталость воздействует на все процессы нагружения (механическое, электрическое, электромагнитное и химическое), при которых имеют место циклические изменения импульсных токов.

В реальных условиях микровыступы металлополимерных пар при электро-термомеханическом трении могут подвергаться следующим термическим нагрузкам: ударное импульсное нагревание и медленное вынужденное охлаждение; нагревание и вынужденное охлаждение с большими темпами; медленное нагревание и интенсивное вынужденное охлаждение; нагревание и охлаждение с малыми темпами. В условиях циклического нагревания и вынужденного охлаждения большое влияние на зарождение и развитие трещин оказывают как многофазность структуры, так и термические свойства отдельных фаз. Определенную роль могут сыграть неметаллические включения (продукты износа фрикционных материалов), которые внедряясь в зарождающиеся трещины и выполняют роль клина, а также распределение трещин на поверхности контртела (рис. 1). При торможении микротрещины играют двоякую роль – с одной стороны острые кромки трещин производят режущее действие, с другой стороны – они заполняются продуктами износа фрикционных материалов (асбополимер, асбокаучук и др.) и оксидами, образующимися вследствие газовой коррозии поверхности трения. Эти включения могут быть одной из основных причин развития трещин, если они имеют полосчатое расположение.

При рассмотрении кинетики роста усталостной трещины по В.С. Ивановой важным является выделение областей изменения длины трещины, в пределах которой сохраняется один и тот же микромеханизм (нормального отрыва, поперечного или продольного микросдвига), контролирующей скорость роста трещины.

Границами этих областей, соответствующих определенным критическим длинам трещин, является выделение областей автомодельного роста трещины, в пределах которых – энергия активизации процесса, контролирующего скорость роста трещин, не зависит от длины трещины и сохраняется один и тот же механизм разрушения. В общем случае процесс усталости в соответствии с диаграммой усталостного разрушения имеет несколько стадий (рис. 2).

О. Н. Романов и др. на основе анализа экспериментальных кинетических кривых диаграмм усталости конструкционных материалов показали, что для различных стадий усталостной микротрещины реализуются следующие скорости их роста: *I* – стадия медленного роста трещин при скоростях их роста менее 10^{-5} – $5 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл; *II* – стадия стабильного роста трещин при скоростях v изменяющихся в диапазоне 10^{-5} – $5 \cdot 10^{-6} < v < 10^{-3}$ мм/цикл; *III* – стадия нестабильного роста трещин при скоростях $v > 10^{-3}$ мм/цикл.



Рис. 1. Характер зарождения и развития трещин по сечению обода тормозного шкива

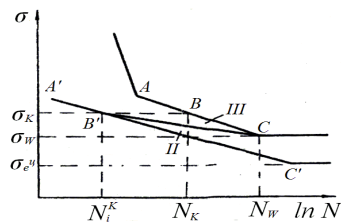


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения по данным В.С. Ивановой; σ_W – предел усталости; σ_K – критическое напряжение усталости; σ_e^H – циклический предел упругости

Необходимо также помнить и о влиянии состояния поверхностного слоя на характер распределения термической нагруженности таких как, например, микроструктура, изменение твердости, шероховатости и волнистости поверхности и др. Следует обратить внимание на появление морщин на поверхности металлического элемента и сетки трещин на поверхности фрикционных материалов после циклического нагревания и вынужденного охлаждения. Как показали исследования В. С. Ивановой эти процессы в случае нагревания и вынужденного охлаждения с большими темпами приводят к изменениям объема, сопровождающих мартенситное превращение в периоды нагревания и охлаждения.

Характерной для рассматриваемого процесса является II – стадия усталостного разрушения, при котором имеет место поперечный микросдвиг материалов.

Качественное и количественное исследования процесса изнашивания и повреждения металлополимерных пар при электротермомеханическом трении позволили установить, что вид разрушения контактных поверхностей определяется термической нагруженностью, внешними механическими, электрическими, электромагнитными и химическими воздействиями на поверхности пятен контактов микровыступов, скоростными токами компонентов омывающей среды и свойствами поверхностных слоев трущихся материалов.

Основная часть возникающих при трении напряжений сосредоточена в подповерхностных слоях металлических элементов трения (рис. 3), что подтверждается известной аналитической зависимостью между временем торможения и эффективной глубиной проникновения теплоты, $b = 1,73\sqrt{at}$. На пятнах фактического касания, как показано Г. А. Фазекасом, А. В. Чичинадзе, В. Черпелем, Ф. Пиггелем и др., эти напряжения становятся пропорциональными температуре вспышки и вызывают сильный нагрев в тонких подповерхностных слоях, что приводит к образованию прожогов, термических пятен и очагов микротрещин.

Поэтому можно считать, что в процессе торможения именно в подповерхностном слое элементов трения при воздействии электрического разряда и температурной вспышки $\vartheta_{всп}$ зарождаются трещины, обусловленные термической усталостью материала. Эти трещины развиваются в результате остывания поверхностного слоя и возникновения температурного градиента от ϑ^* , когда термические напряжения в подповерхностном слое достигают наибольших значений и проходят через максимум. При повышении температуры изменяется характер перемещения структурных составляющих в материале, снижается прочность границ зерен и увеличивается скорость окисления.

Анализ механизма изнашивания фрикционных пар показал, что в условиях циклического нагревания и вынужденного охлаждения большое влияние на зарождение и развитие трещин оказывают как многофазность структуры, так и термические свойства отдельных фаз. Определенную роль в раз-

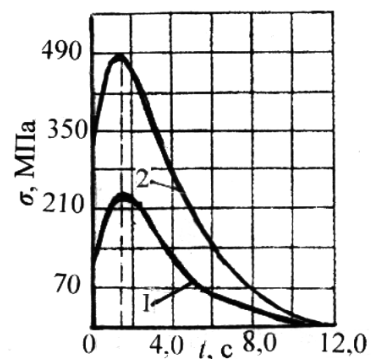


Рис. 3 Изменение поверхностных напряжений в материале обода шкива, вызванные температурами вспышки и температурными градиентами в процессе

рушении материала играет характер распределения трещин по поверхности.

Поскольку температуры вспышки могут быстро достичь нескольких сот градусов, то такой их скачок приводит материал в состояние пластичности, когда сопротивление трению уменьшается. Поскольку длительность взаимодействия на пятнах фактического контакта микровыступов составляет $10^{-3} - 10^{-6}$ с, то важное значение имеют не свойства статической прочности поверхностного слоя материала пары трения, а возникновение усталостной прочности, если учесть, что кристаллическая решетка твердого тела реагирует на воздействия через $10^{-5} - 10^{-8}$ с. Поэтому перестройка поверхностного слоя под действием внешних электрических и тепловых токов происходит именно при преобладании температурного поля и к моменту достижения установившейся температуры поверхностный слой обода шкива уже находится под действием тех или иных остаточных напряжений.

Проведенные исследования показали, что значительное влияние на основные показатели качества поверхностного слоя обода тормозного шкива оказывает скорость протекания теплового процесса.

Скорость электротермомеханических процессов обуславливает существенное изменение характера структурных превращений в поверхностных и подповерхностных слоях, а также физико-механических свойств материала обода шкива. В процессе трения зона пластической деформации не ограничивается объемом микронеровностей, а простирается вглубь материалов. При этом материал поверхностного и подповерхностного слоев имеет невысокую плотность дислокаций. При скольжении дислокации накапливаются на некотором расстоянии от поверхности, происходит повышение их плотности, что приводит к образованию микропустот в подповерхностном слое обода шкива.

Анализ напряженного состояния поверхностного слоя обода шкива при торможении показал, что силы трения способствуют упрочнению поверхностного слоя и возникновению сжимающих остаточных напряжений. Температурные деформации приводят, как правило, к развитию в поверхностном слое эффекта разупрочнения, связанного с образованием растягивающих остаточных напряжений.

На глубину нагревания поверхностных слоев обода шкива оказывает существенное влияние интенсивность вынужденного охлаждения (критерий Био). При одинаковых параметрах теплового источника максимальная глубина прогрева поверхностного слоя до заданной температуры при охлаждении всегда меньше, чем без охлаждения. Наличие теплоотдачи увеличивает скорость вынужденного охлаждения полированной и матовых поверхностей шкива, но по мере удаления от них влияние охлаждения уменьшается. Это особенно важно для пар трения тормозов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Поскольку электротермомеханическое воздействие влияет на характер изменения скоростей нагревания и охлаждения, а также температур по толщине обода, его можно использовать при исследовании влияния условий вынужденного охлаждения на кинетику теплового процесса.

Предложенная теоретическая модель механизма разрушения в результате электротермомеханического нагружения при трении подтверждает предположение об образовании поверхностного слоя на ободке шкива с низкой плотностью дислокаций и интенсивным трещинообразованием в подповерхностных слоях, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований Ц.Су.

Заслуживают внимание также работы Л. М. Рыбаковой и Л. И. Куксеновой, посвященные методу рентгенографического исследования структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении.

Известно, что электротепловая и внешняя нагрузки, приложенные к твердому телу, вызывают напряжения межатомных связей, которые из-за гетерогенности строения большинства твердых тел могут носить локальный характер. Именно на фактических пятнах касания микровыступов происходят локальные перенапряжения, наиболее интенсивно идет термофлуктуационный процесс разрыва межатомных связей, что приводит к разрушению твердого тела. Согласно кинетической концепции прочности электротепловое движение атомов, характеристикой которого является температура, играет существенную роль в разрушении твердого тела.

На рис. 4 показано влияние температуры на относительные деформации σ/E обода шкива (где σ_n – предел прочности; σ_s – напряжение, вызванное электротепловыми импульсами). Этот эффект может быть полезным при построении различных схем расчета остаточных микронапряжений, без знания которых невозможно дать полную оценку состояния поверхностного слоя материалов, работающих в условиях повторно-кратковременного режима нагружения. Конструкторско-технологические и эксплуатационные пути управления тепловой стойкостью элементов трения схематически показаны на рис. 5.

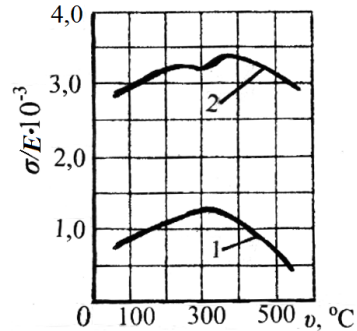


Рис. 4. Эффект влияния поверхностной температуры на относительные деформации материала обода шкива: кривая 1 – σ_n/E ; кривая 2 – σ_s/E

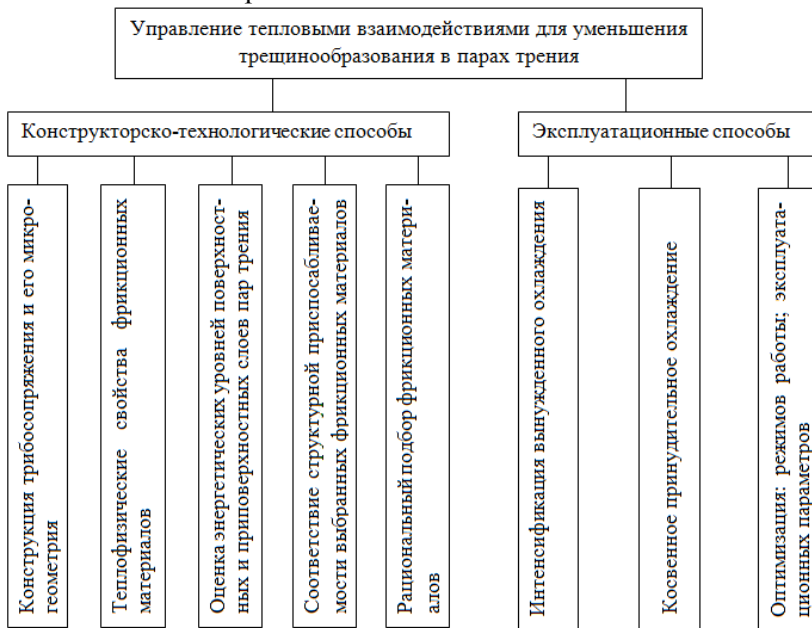


Рис. 5. Способы управления тепловыми воздействиями для предотвращения трещинообразования на рабочих поверхностях металлополимерных пар трения в процессе их нагревания

Явление теплового разрушения материалов при торможении представляет собой тот механизм, воздействуя на который можно управлять процессами трения и изнашивания. Зная основные внутренние параметры теплового разрушения и влияние на них конструкции, материалов, режимных параметров, интенсивности вынужденного охлаждения и др., можно обоснованно управлять этим явлением.

Рассмотрение теоретической модели процесса изнашивания (разрушения) в результате электротермомеханического нагружения показывает, что на поверхностных слоях металлического элемента трения плотность дислокаций низкая, это приводит к трещинообразованию в его подповерхностных слоях.

Эта модель может служить основой при конструктивной разработке металлического элемента трения на стадии его проектирования, что было успешно реализовано в работах [3; 4; 5].

Наиболее эффективным способом борьбы с отрицательным действием температурных напряжений, приводящим к образованию трещины, является усовершенствование конструктивных форм. Однако правила конструирования термостойкости конструкций часто приходят в противоречие с правилами конструирования с учетом механических нагрузок. Так, более высоким сопротивлением появлению термических трещин в тормозном шкиве лебедки обладает самый тонкий обод, поскольку в этом случае обеспечивается меньшее стеснение теплового расширения, вызываемое нагревом при торможении. В тоже время прочностные требования вызывают необходимость увеличения толщины обода шкива.

В основу конструирования должен быть заложен принцип, согласно которому следует по возможности исключать массивные элементы, мешающие свободному расширению менее массивных нагретых участков.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что при электротермомеханическом трении микровыступов металлополимерных пар тормозных устройств основными факторами, способствующими возникновению и развитию микротрещин на рабочих поверхностях металлических фрикционных элементов является трибозффект, порождающий электрическое и тепловое поле под воздействием механического поля.

Формирование напряженного состояния обода шкива. Прежде чем остановимся на формировании напряженного состояния в тормозном шкиве рассмотрим особенности интересующей части конструкции буровой лебедки (рис. 6). Тормозной шкив 1 имеет крепежный выступ 3, который с помощью болтов (установлены с зазором, на рис. 6 не показаны) присоединен к фланцу 6 барабана 7 лебедки, посаженного на подъемный вал 8 с помощью шпонок (на рис. 6 не показаны), являющихся центрирующим устройством для обода шкива 1 относительно фланца 6 барабана 7.

Одной из основных причин возникновения трещин на рабочих поверхностях ободов тормозных шкивов и возможного их разрыва в процессе эксплуатации является наличие в них значительных остаточных напряжений. Последние вызваны необратимыми объемными изменениями в материалах обода шкива, связанных с пластической деформацией его поверхностного слоя под воздействием аperiodических процессов нагревания и вынужденного охлаждения. Однако существенное влияние на формирование остаточных напряжений в ободу тормозного шкива оказывают как конструктивные, так и эксплуатационные параметры. К конструктивным параметрам следует отнести:

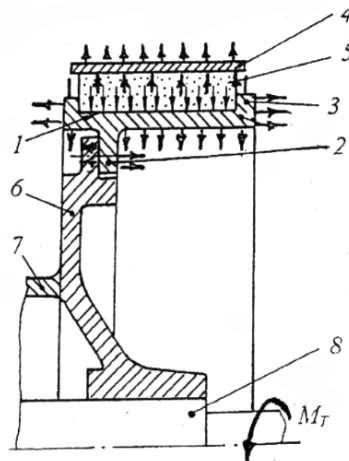


Рис. 6. Схема узла трения тормоза в сборе с барабаном лебедки при торможении во взаимодействии со скоростными токами омывающего воздуха: 1, 2, 3 – тормозной шкив с крепежным выступом и с ребрами; 4 – тормозная лента; 5 – фрикционная накладка; 6, 7 – фланец барабана лебедки; 8 – подъемный вал; M_T – тормозной момент

- толщину и ширину обода тормозного шкива и радиус его рабочей поверхности;
- толщину крепежного выступа обода шкива и его место расположения по отношению к ширине обода;
- отношение площадей поперечного сечения крепежного выступа обода шкива к фланцу барабана.

К эксплуатационным параметрам металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки необходимо отнести:

- действующие удельные нагрузки в парах трения;
- поверхностная и объемная температуры: рабочей и внутренней поверхности обода; средняя объемная обода и фланца барабана;
- градиенты температуры по рабочей поверхности обода и его толщине, а также по толщине фланца барабана;
- темпы нагревания и вынужденного охлаждения обода шкива и его крепежного выступа.

Из физико-механических свойств материалов обода шкива необходимо выделить параметры: коэффициент линейного расширения и модель упругости. При этом на физико-механические свойства материалов обода шкива существенное влияние оказывает импульсный и длительный подвод теплоты к его рабочей поверхности.

В процессе электротермомеханического трения при импульсной и длительной передаче теплоты от слоя к слою обода шкива существенную роль играет их термическое сопротивление. Чем больше расстояние от рабочей поверхности обода шкива до его середины, тем меньше внутреннее термическое сопротивление из-за ослабления теплового тока, прошивающего толщину очередного слоя обода.

Величина поверхностной температуры зависит не только от числа спуско-подъемных операций, выполняемых ленточно-колодочным тормозом буровой лебедки, но и от физико-химических свойств подповерхностных слоев их металлополимерных пар трения. Установлено, что в начале спуска бурового инструмента генерируемая электрическая и тепловая энергия затрачивается на прогрев обода шкива. При этом прирост температуры в обode шкива является минималь-

ным, но зато в дальнейшем он возрастает за счет увеличения времени торможения и слабой вынужденной конвективной и радиационной теплоотдачи от матовых поверхностей шкива скоростными токами омывающей среды. Причиной является увеличение работы торможения, выполняемой узлами трения и способствующей полному прогреву обода шкива в процессе спуска колонны бурильных труб в скважину. Таким образом, на начальной стадии торможения, в большинстве случаев необходимо регулировать величину градиента температуры по толщине обода шкива (поперечное регулирование). В дальнейшем, при полном прогреве обода шкива будет наблюдаться, в основном, прирост температуры на рабочей поверхности обода шкива, а следовательно, и величины поверхностного градиента температуры (продольное регулирование).

Что касается крепежного выступа обода тормозного шкива, то его роль в процессах теплообмена является особой. Сток теплоты от обода тормозного шкива к крепежному выступу и далее к фланцу барабана происходит в начале спуска бурового инструмента. В этом случае градиент температуры по толщине обода барабана и крепежного выступа является максимальным. При этом необходимо иметь в виду, что обод тормозного шкива выполнен как одно целое с крепежным выступом, который, в свою очередь, крепится к металлоемкому фланцу барабана лебедки. От плотности крепления, а следовательно, и теплового кондуктивного теплообмена и зависит энергонагруженность металлоемкости рабочей поверхности обода шкива, которое и вызывает перераспределение тепловых токов не только в ободе, но и в крепежном его выступе. При этом прогрев крепежного выступа обода шкива происходит быстрее самого обода, поскольку металлоемкость первого в десятки раз меньше за металлоемкость обода. Однако крепежный выступ обода шкива может играть определенную роль в возникновении обратного знака температурного градиента за счет вынужденного охлаждения рабочей поверхности обода шкива при деструктивных изменениях в поверхностных слоях фрикционных накладок, достигших температур выше допустимых для их материалов. При этом обод тормозного шкива попадает в зону термостабилизационного состояния, которое в зависимости от металлоемкости обода может составить от трех до десяти минут [6]. Такое состояние обода тормозного шкива отрицательно сказывается на эффективности действия металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Напряженное состояние обода тормозного шкива формируется из следующих слагаемых:

– динамического – от действия удельных нагрузок в металлополимерных парах трения;

– теплового – от наличия действия температурных градиентов по толщине в парах «наружная поверхность обода шкива – верхний торец крепежного выступа» и «нижний торец крепежного выступа – торец фланца барабана», а также поверхностных градиентов при отношении площади поперечного сечения выступа обода к фланцу барабана.

На основании вышеизложенного перейдем к аналитическому определению остаточных напряжений в ободе тормозного шкива.

Аналитическое определение остаточных напряжений в ободе тормозного шкива. Остановимся на определении составляющих сжимающих напряжений, действующих на рабочую поверхность обода шкива в процессе спускоподъем-

ных операций. Максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ в ободке шкива будет на его рабочей поверхности и они равны алгебраической сумме составляющих

$$\sigma_{1\max} = -\sigma_{\kappa} - \sigma_1 - \sigma_2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\kappa}, \sigma_1, \sigma_2$ - напряжения в ободке шкива от действия: удельных нагрузок в парах трения; температурных градиентов на его рабочей поверхности; объемной температуры: крепежного выступа (t_6) и обода шкива ($t_{об}$) при условии ($t_{об} > t_6$).

$$\sigma_{\kappa} = \frac{pR}{\delta}, \quad (2)$$

где p - удельные нагрузки в металлополимерных парах трения; R - радиус рабочей поверхности обода шкива; δ - толщина обода шкива.

$$\sigma_1 = \frac{\alpha E(t_1 - t_1')}{2(1 - \mu)}, \quad (3)$$

где α - коэффициент линейного расширения; E - модуль упругости; t_1, t_1' - температуры: рабочей и внутренней поверхности обода шкива; μ - коэффициент Пуассона.

$$\sigma_2 = \frac{\alpha E(t_{1cp} - t_{2cp})}{1 + A_1 / A_2}, \quad (4)$$

где t_{1cp}, t_{2cp} - объемная температура крепежного выступа и фланца барабана; A_1, A_2 - площади поперечных сечений крепежных выступов обода и фланца барабана.

Для более точного определения составляющих σ_1 и σ_2 в зависимости (3) вместо $(t_1 - t_1')$ можно подставить слагаемое $\tau \left(\frac{\partial t_1}{\partial \tau_1} - \frac{\partial t_1'}{\partial \tau_1'} \right)$ (где τ - время торможения;

τ_1, τ_1' - время достижения температур t_1 и t_1') которое характеризует темп нагревания обода шкива, а в зависимость (4) вместо $(t_{1cp} - t_{2cp})$ -

$\delta_{cp} \left(\frac{\partial t_{1cp}}{\partial \delta_1} - \frac{\partial t_{2cp}}{\partial \delta_2} \right)$ (где $\delta_1, \delta_2, \delta_{cp}$ - толщины: крепежного выступа; фланца бара-

бана; их средняя величина), которая характеризует температурные градиенты по толщине рассматриваемых элементов.

При определении общей температуры, генерируемой на пятнах контактов микровыступов, имеющих дискретные характеристики с различной энергетической активностью, расположенных на них микроконденсаторов и -термобатарей с мгновенным их переключением при поляризации за счет изменения площадей пятен контактов микровыступов при соблюдении условий: на первой стадии фрикционного взаимодействия ($A_r \ll A_a$), что фактическая площадь контактирования (A_r) мала по сравнению с номинальной (A_a) производится суммирование составляющих генерируемых токов, а при $A_a \rightarrow A_r$ фиксируется трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентом механических свойств его материалов. При этом темп проникновения взаимодействующих между собой импульсов электрического и теплового токов влияет на интенсивность износа микровыступов при переполяризации, а величины тепловых токов на пятнах контактов микровыступов определяются формулой

$$t_{обш} = t_{II} + t_{ecn} + t, \quad (5)$$

где t_{II} – поверхностная температура от трения и контактного сопротивления, вызванная генерируемыми токами на пятнах контактов микровыступов, а также фрикционной составляющей; $t_{всп}$ – температура вспышки, вызванная разрядными токами между микровыступами; t – объемная температура, вызванная действием первых двух составляющих температур, а также от джоулевой теплоты.

Температура t_{II} определяется из условия действия двух источников теплоты (электрического и фрикционного) в зоне трения

$$t_{II} = \frac{0,942q_0k}{\lambda_1} \sqrt{\frac{k_m d_{cp}}{\pi V}}, \quad (6)$$

где $q_0 = \frac{1}{A_r} \left[I^2 \left(\frac{\rho \sqrt{HB}}{\sqrt{\pi N}} + \frac{\sigma HB}{N} \right) + fNV \right]$ – тепловой поток на контактной по-

верхности с учетом электрической и фрикционной составляющих, Вт/м²; A_r – фактическая площадь касания, мм²; I – генерируемый ток в парах трения, А; ρ – удельное сопротивление контактных материалов, Ом·мм²/м; HB – приведенная твердость по Бринеллю контактных материалов, МПа; N – импульсное нормальное усилие, действующее в зоне контакта материалов, Н; σ – удельное сопротивление пленок на контакте, Ом·мм²/м; f – динамический коэффициент трения; V – скорость скольжения, м/с; k – приведенный коэффициент распределения теплового потока; k_m – коэффициент распределения теплового потока, попадающего в металлический фрикционный элемент; λ_1 – приведенный коэффициент теплопроводности материалов пар трения, Вт/(м·°C); d_{cp} – средний диаметр пятна контакта, определяемый с учетом реальной его шероховатости, мм.

Температурную вспышку $t_{всп}$ определяют по зависимости вида [2]

$$t_{всп} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{fNd_{cp}}{A_r \lambda_1 \left[4 + (\pi Pe)^{\frac{1}{2}} \right]}, \quad (7)$$

где A_r – фактическая площадь контакта, которая представляет собой сумму элементарных пятен касания, мм²; $Pe = \frac{V \cdot d_{cp}}{a}$ – критерий Пекле; a – приведенный коэффициент температуропроводности материалов пар трения, м/с².

Объемная температура металлического фрикционного элемента определяется из условия равенства тепловых потоков на контактной поверхности с учетом электрической и фрикционной составляющей и которые отводятся от его поверхностей скоростными токами омывающей среды

$$t = \frac{4I^2 \rho}{\pi^2 d_{cp}^3 k_m \cdot 10^2}, \quad (8)$$

и в конечном итоге общая температура контактных поверхностей металлополимерных пар трения равна

$$t_{общ} = \frac{0,942q_0k}{\lambda_1} \sqrt{\frac{k_m d_{cp}}{\pi V}} + \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{fNd_{cp}}{A_r \lambda_1 \left[4 + (\pi Pe)^{\frac{1}{2}} \right]} + \frac{4I^2 \rho}{\pi^2 d_{cp}^3 k_m \cdot 10^2}, \quad (9)$$

по составляющих которой оценивают энергетические уровни поверхностных и подповерхностных их слоев.

Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в ободу шкива от действия динамических, электрических и тепловых нагрузок определяются в соответствии с теоремой Генки

$$\sigma_{ост} = (-\sigma_T) - (-\sigma_{1max}), \quad (10)$$

где σ_T – предел текучести металла при исследуемой температуре.

На основании вышеизложенного перейдем к рассмотрению влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на напряженное состояние обода тормозного шкива.

Влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на напряженное состояние обода шкива. Одним из основных эксплуатационных параметров для ободов тормозных шкивов являются его поверхностные и по толщине температурные градиенты, развивающиеся при фрикционном взаимодействии металлополимерных пар трения.

Согласно методики, разработанной академиком А. Х. Джанахмедовым [7; 8], выполнены расчеты теплового нагревания обода шкива и фрикционной накладки в процессе торможения при импульсном и длительных режимах тепловой нагрузки их поверхностей (табл. 1) и при проникновении теплоты вглубь фрикционных материалов элементов трения на величину 0,4 мм (рис. 7).

Таблица 1

Результаты расчетов поверхностных температурных градиентов и темпов нагревания элементов пары трения ленточно-колодочного тормоза при подводе теплоты в процессе торможения

Нагружение тепловыми токами элементов трения											
накладки						обода шкива					
Интервалы изменения теплофизических и геометрических параметров элементов трения											
τ, c	$\Delta t, ^\circ C$	$a_n, m^2/c$	l_n, m	$\frac{\partial \Delta t}{\partial l_n}, \frac{^\circ C}{cm}$	$\frac{d\Delta t}{d\tau}, \frac{^\circ C}{c}$	τ, c	$\Delta t, ^\circ C$	$a_{ш}, m^2/c$	$l_{ш}, m$	$\frac{\partial \Delta t}{\partial l_{ш}}, \frac{^\circ C}{cm}$	$\frac{d\Delta t}{d\tau}, \frac{^\circ C}{c}$
2,0–14,0	10–50	$(1,86–6,5) \cdot 10^{-7}$	0,23	0,435–2,174	0,026–0,044	2,0–14,0	10–50	$8,6 \cdot 10^{-6}–1,1 \cdot 10^{-5}$	0,23	0,417–2,083	0,357–2,217

Доказано, что при импульсном и длительном режимах подвода теплоты в зону контактирования металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза темп нагревания вызывает изменение температурных градиентов по их толщине следующим образом:

на одинаковой глубине (0,4 мм) фрикционных материалов:
полимерной накладки

– при импульсном режиме подведения теплоты за время $(2,0–14,0) \cdot 10^{-4}$ с при разности температур $(1,0–5,0^\circ C)$ и изменении a_n от 6,0 до $2,0 \cdot 10^{-7}$ м²/с градиенты температуры были равны $(2,5–12,5$ °C/мм), в то время как темп нагревания изменялся от 29,9 до 228,5 °C/с, т.е. он заметно уменьшался с увеличением времени действия импульсного теплового тока;

– при длительном режиме подведения теплоты за время $(2,0–14,0)$ с при разности температур $(1,0–5,0^\circ C)$ и изменении a_n от 6,0 до $2,0 \cdot 10^{-7}$ м²/с градиенты температуры были равны $(2,5–12,5$ °C/мм), в то время как темп нагревания изменялся от 0,2992 до 2,285 °C/с, несмотря на то, что время действия теплового тока увеличивалось в 7,0 раз;

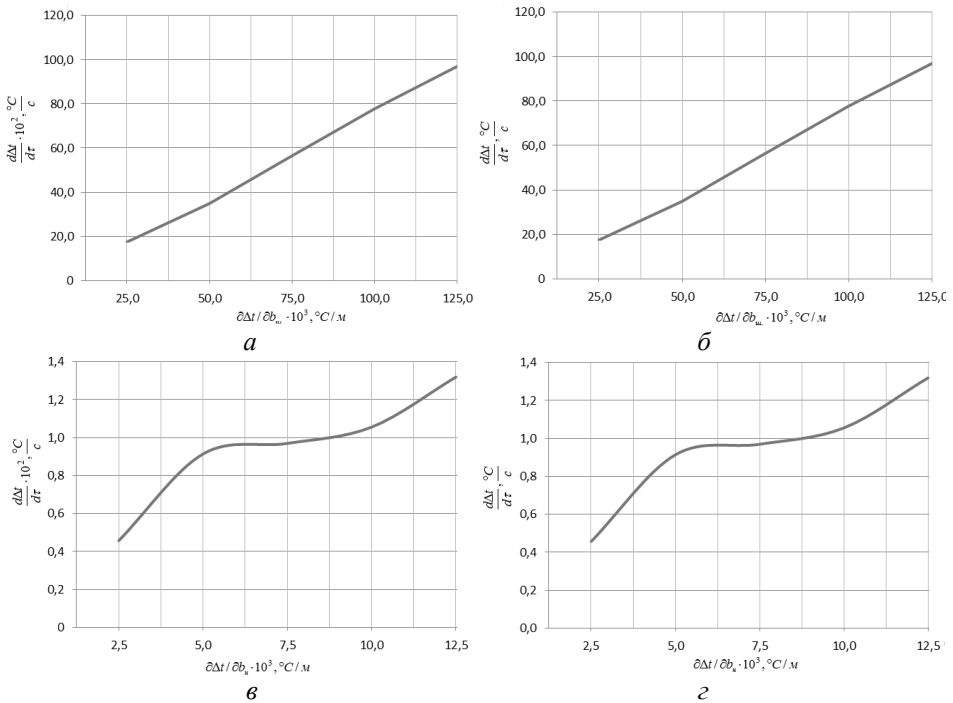


Рис. 7. Закономерности изменения темпа нагревания ($d\Delta t/d\tau$) материалов обода шкива (а, б) фрикционной накладки (в, г) от температурных градиентов ($\partial\Delta t/\partial b_u$ і $\partial\Delta t/\partial b_n$) при $b_u=b_n=0,4$ мм при подведении теплоты на режимах: а, в – импульсном ($\tau = 6,0 \cdot 10^{-4}$ с); б, г – длительном ($\tau = 6,0$ с)

обода тормозного шкива

– при импульсном режиме подведения теплоты за время $(2,0-14,0) \cdot 10^{-4}$ с при разности температур $(10-50)^\circ\text{C}$ и изменении $a_{ш}$ от $8,7 \cdot 10^{-6}$ до $1,08 \cdot 10^{-5}$ м²/с градиенты температуры были равны $(25,0-125,0)^\circ\text{C}/\text{мм}$, в то время как темп нагревания изменялся от $11,38 \cdot 10^2$ до $167,9 \cdot 10^2$ °C/с, т.е. он заметно уменьшался с увеличением времени действия импульса теплового тока;

– при длительном режиме подведения теплоты за время $(2,0-14,0)$ с при разности температур $(10-50)^\circ\text{C}$ и изменении $a_{ш}$ от $8,7 \cdot 10^{-6}$ до $1,08 \cdot 10^{-5}$ м²/с градиенты температуры были равны $(25,0-125,0)^\circ\text{C}/\text{мм}$, в то время как темп нагревания изменялся от $11,38$ до $167,9$ °C/с, т.е. он заметно уменьшался с увеличением длительности действия теплового тока.

В табл. 2 приведены результаты расчетов температурных градиентов при проникновении теплоты на толщину $0,4 \dots 1,0$ мм в элементы пары трения тормоза и темпы их нагревания при импульсном и длительном подводе теплоты в процессе торможения. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

при импульсном подводе тепловых токов:

– импульсный подвод токов оказывает существенное влияние на поверхностные и подповерхностные слои обода шкива, в которых происходят фазовые превращения, ведущие к образованию в нем аустенита; это обстоятельство приводит к уменьшению объема поверхностного слоя обода из-за его неравномерного прогрева, вызванного воздействием импульсных токов; в это же время объем всех нижележащих слоев обода увеличивается из-за линейного расширения, вы-

званного их нагреванием; в результате чего внешний аустенитный неравномерный слой сжимает внутренний объем слоев обода и при этом в первом развиваются напряжения сжатия, способствующие в местах наиболее тонких поперечных сечений, ослабленных прошивающими их импульсными тепловыми токами возникновению поперечных трещин на рабочей поверхности обода;

– градиент температуры, а также темп нагревания, как в слоях обода шкива, так и в слоях фрикционной накладки уменьшаются в связи с тем, что падает термическое сопротивление (δ/λ , λ – коэффициент теплопроводности материалов обода шкива и накладки) слоев материалов пары трения;

Таблица 2

Результаты расчетов температурных градиентов по толщине и темпов нагревания элементов пары трения ленточно-колодочного тормоза при импульсном и длительном подводе теплоты в процессе торможения

		Интервалы изменения теплофизических и геометрических параметров элементов трения						
		τ , с	Δt , °C	a , м ² /с	$b_{эф}$, м	δ , мм	$\frac{\partial \Delta t}{\partial \delta}$, $\frac{°C}{мм}$	$\frac{d\Delta t}{d\tau}$, $\frac{°C}{с}$
Нагружение тепловыми токами элементов трения накладки шкива	импульсное	$(2,0-14,0) \cdot 10^{-4}$	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{(2,0-6,0) \cdot 10^{-7}}{8,7 \cdot 10^{-6} - 1,08 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{(1,094-5,014) \cdot 10^{-5}}{7,208 \cdot 10^{-5} - 2,127 \cdot 10^{-4}}$	0,4	$\frac{2,5-12,5}{25,0-125,0}$	$\frac{29,9-228,5}{(11,38-167,9) \cdot 10^2}$
						0,6	$\frac{1,67-8,33}{16,67-83,3}$	$\frac{19,9-152,3}{(7,58-111,94) \cdot 10^2}$
						0,8	$\frac{1,25-6,25}{12,5-62,5}$	$\frac{15,0-114,2}{(5,69-83,95) \cdot 10^2}$
						1,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{12,0-91,4}{(4,55-67,16) \cdot 10^2}$
	длительное	2,0-14,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{(2,0-6,0) \cdot 10^{-7}}{8,7 \cdot 10^{-6} - 1,08 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{(1,094-5,014) \cdot 10^{-3}}{7,2 \cdot 10^{-3} - 2,12 \cdot 10^{-2}}$	0,4	$\frac{2,5-12,5}{25,0-125,0}$	$\frac{0,299-2,285}{11,38-167,9}$
						0,6	$\frac{1,67-8,33}{16,67-83,3}$	$\frac{0,199-1,523}{7,58-111,94}$
						0,8	$\frac{1,25-6,25}{12,5-62,5}$	$\frac{0,15-1,14}{5,69-83,95}$
						1,0	$\frac{1,0-5,0}{10,0-50,0}$	$\frac{0,12-0,91}{4,55-67,16}$

* В числителе приведены параметры применительно к ободу шкива, а в знаменателе – к фрикционной накладке

при длительном подводе тепловых токов:

– достигается эффективное проникновение тепловых токов на большую глубину элементов трения из-за длительности действия работы трения, и как следствие, более равномерного прогрева их слоев;

– изменение градиентов температуры по величине в элементах пары трения остается таким же как и при импульсном подводе тепловых токов, но зато темп нагревания слоев материалов пары трения уменьшается в сто раз, несмотря на то, что время действия тепловых токов увеличилось на 10^4 .

Произведем анализ закономерностей изменения сжимающих напряжений обода шкива в интервале от 350,0 до 100,0 МПа, полученных расчетным путем по зависимостям (1)–(4) и на основании которых были построены графические зависимости с

учетом конструктивных и эксплуатационных параметров пар трения при фрикционном взаимодействии, исходя из следующих соображений и при этом:

1) переменными параметрами являются удельные нагрузки ($p = 0,2-1,0$ МПа), объемная температура ($t_{об} = 50,0-200,0^\circ\text{C}$), радиус рабочей поверхности обода шкива ($R = 0,15-0,75$ м) и его толщины ($\delta = 8,0-16,0$ мм), а постоянной величиной являлось отношение площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана ($A_1/A_2 = 0,5$);

2) переменными параметрами являются удельные нагрузки ($p = 0,2-1,0$ МПа), объемная температура ($t_{об}$) для каждого из случаев ее действие в отдельности (50; 100; 150 и 200 $^\circ\text{C}$), радиус рабочей поверхности обода шкива ($R = 0,15-0,75$ м) и отношение площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана ($A_1/A_2 = 0,25-1,0$), а постоянной величиной являлась толщина обода шкива ($\delta = 12,0$ мм);

3) переменными параметрами являются удельные нагрузки ($p = 0,2-1,0$ МПа), объемная температура ($t_{об}$) для каждого из случаев ее действие в отдельности (50; 100; 150 и 200 $^\circ\text{C}$), радиус рабочей поверхности обода шкива ($R = 0,15-0,75$ м) и его толщины ($\delta = 8,0-16,0$ мм), а постоянной величиной являлось отношения площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана ($A_1/A_2 = 0,5$);

4) переменными параметрами являются удельные нагрузки ($p = 0,2-1,0$ МПа), объемная температура ($t_{об} = 50,0-200,0^\circ\text{C}$), отношение площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана ($A_1/A_2 = 0,25-1,0$), а постоянными величинами являются радиус рабочей поверхности обода шкива ($R = 0,725$ м) и его толщина ($\delta = 20,0$ мм) (рис. 8).

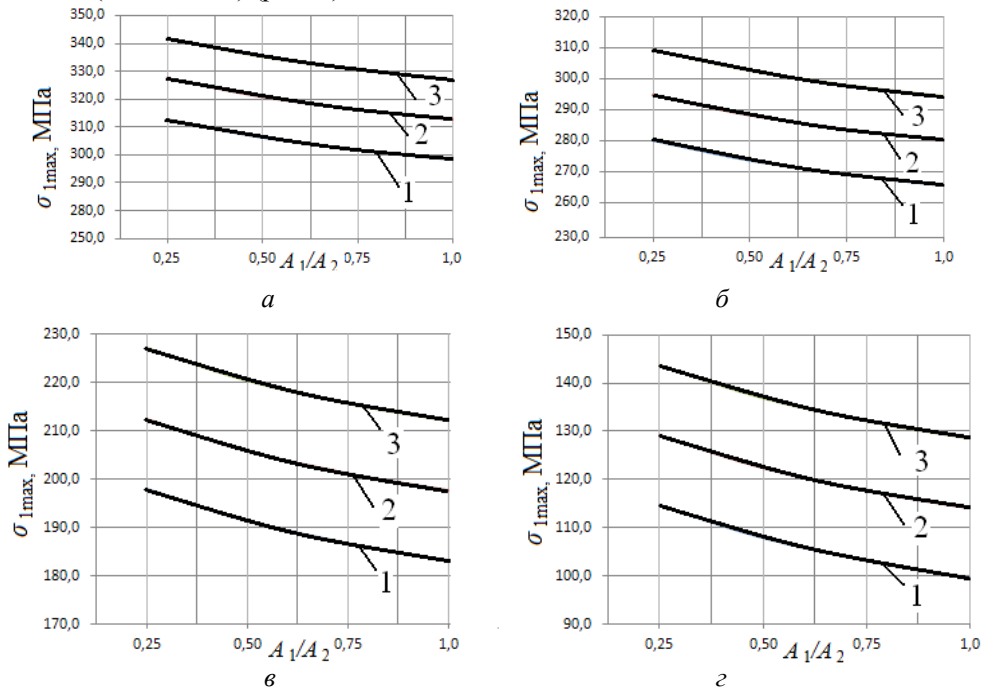


Рис. 8. Зависимость максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{1\max}$ от величины отношения площадей поперечного сечения выступа обода шкива к фланцу барабана A_1/A_2 при: постоянных толщине обода ($\delta = 20,0$ мм) и его радиуса ($R = 0,725$ м), и переменных: объемной температуры: а - $t_{об} = 50^\circ\text{C}$, б - $t_{об} = 100^\circ\text{C}$; в - $t_{об} = 150^\circ\text{C}$; г - $t_{об} = 200^\circ\text{C}$; удельных нагрузках: 1 - $p = 0,2$ МПа, 2 - $p = 0,6$ МПа, 3 - $p = 1,0$ МПа

Проведем сравнительный анализ вариантов взаимосвязи конструктивных и эксплуатационных параметров тормозных шкивов на основании построенных графических зависимостей, который позволил установить следующее:

– максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ имели наибольшую величину 400,0 МПа при удельных нагрузках в парах трения $p = 1,0$ МПа, толщине обода шкива $\delta = 8,0$ мм и его радиусе рабочей поверхности $R = 0,725$ м и объемной температуре $50,0^\circ\text{C}$; при изменении удельных нагрузок от 0,2 до 1,0 МПа наблюдалось падение максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{1\max}$ от 300,0 до 100,0 МПа в ободу шкива с толщиной $\delta = 16,0$ мм ($R = 0,15$ м) и повышение его объемной температуры от $50,0$ до $200,0^\circ\text{C}$, т.е. удельные нагрузки почти не оказали влияние на максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$, а также постоянная величина отношения $A_1/A_2 = 0,5$ (первый вариант);

– максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ имели наибольшую величину 367,5 МПа при удельных нагрузках в парах трения $p = 1,0$ МПа, толщине обода шкива $\delta = 12,0$ мм и его радиусе рабочей поверхности $R = 0,75$ м и объемной температуре $50,0^\circ\text{C}$, величине отношения площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана $A_1/A_2 = 0,25$; при этом с повышением объемной температуры обода шкива и увеличения отношения A_1/A_2 до 1,0 имела место тенденция снижения максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{1\max}$ до величины 105,0 МПа (второй вариант);

– максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ имели наибольшую величину 393,0 МПа при удельных нагрузках в парах трения $p = 1,0$ МПа, толщине обода шкива $\delta = 8,0$ мм, и его радиусе рабочей поверхности $R = 0,75$ м и объемной температуре $50,0^\circ\text{C}$ при постоянной величине отношения $A_1/A_2 = 0,5$; при этом увеличение толщины обода шкива от 8,0 до 16,0 мм с ростом его объемной температуры от $50,0$ до $200,0^\circ\text{C}$ способствовало снижению максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{1\max}$ до величины 110,0 МПа (третий вариант);

– максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ были наибольшими т.е. 340,0 МПа при удельных нагрузках в пара трения $p = 1,0$ МПа, толщине обода шкива $\delta = 20,0$ мм и его радиусе рабочей поверхности $R = 0,725$ м и объемной температуре $50,0^\circ\text{C}$ при величине отношения площади поперечного сечения крепежного выступа обода к фланцу барабана $A_1/A_2 = 0,25$; при этом с повышением объемной температуры обода шкива с $50,0$ до 200°C при удельной нагрузке в парах трения $p = 1,0$ МПа и при достижении $A_1/A_2 = 1,0$ наблюдалось снижение максимальных сжимающих напряжений $\sigma_{1\max}$ до величины 128,0 МПа (четвертый вариант); апробированные конструктивные и эксплуатационные параметры полностью отвечают тормозному шкиву буровой лебедки У2-5-5.

Перейдем непосредственно к рассмотрению поверхностного разрушения металлополимерных пар трения при электротермомеханическом трении.

Поверхностное разрушение при электротермомеханическом трении металлополимерных пар трения. При исследовании поверхностного разрушения пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения наблюдаются микроскопические и макроскопические формы износа. Первые наблюдаются при нормальном износе, а вторые – при повреждаемости. Для первого и второго видов износов устанавливаются допустимые и критические величины (рис. 9).

При электротермомеханическом трении микровыступов металлополимерных пар при нормальном изнашивании макроскопические разрушения не наблюдаются.

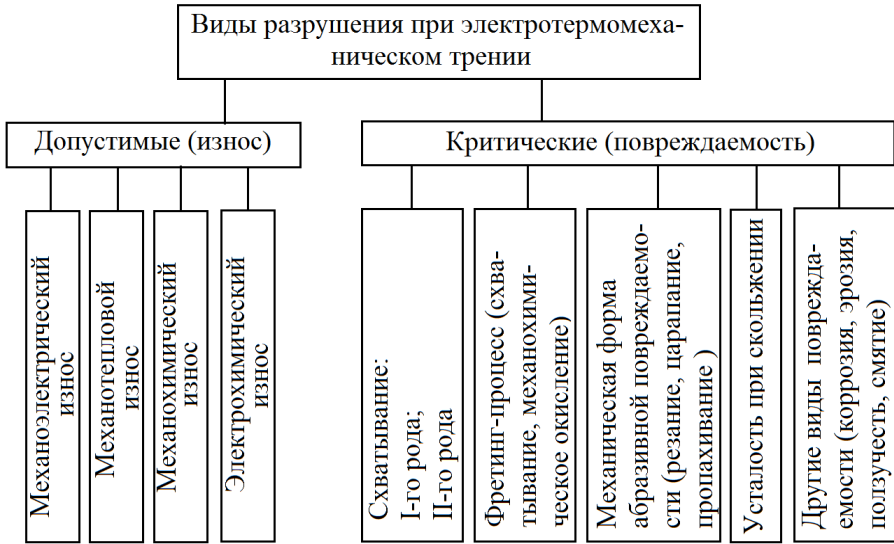


Рис. 9. Классификация видов износа и повреждаемости при электротермомеханическом трении металлополимерных пар тормозных устройств

Особенностями нормального изнашивания являются субмикроскопические размеры объектов разрушения (вторичные структуры I и II типов), их поверхностное расположение на пятнах контактов микровыступов, находящихся под воздействием механического, электрического, теплового, электромагнитного и химического полей, которые омываются скоростными токами компонентов среды. При этом неизбежное изменение не только структуры поверхностных слоев пятен контактов микровыступов, но и их химического состава в процессе разрушения тонких пленок вторичных структур. В этом случае необходимо рассматривать энергетические уровни (электронно-ионные), взаимодействующих пар трения «металл-полимер» с различными типами контактов (рис. 10).

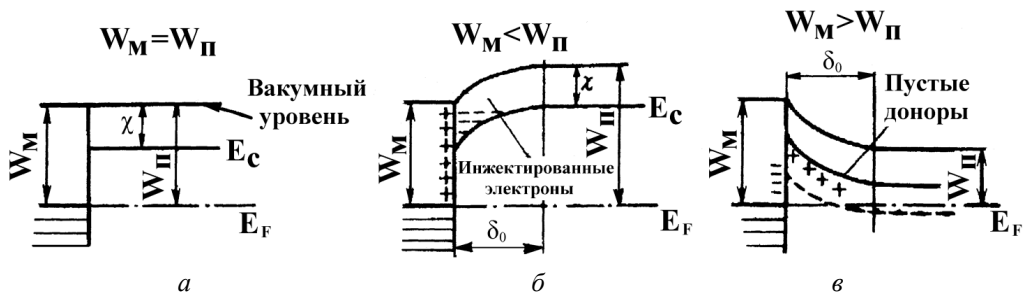


Рис. 10. Энергетические уровни взаимодействующих пар трения «металл-полимер» с различными типами контактов: *a* – нейтральный; *б* – омический или инжектирующий; *в* – блокирующий; E_C , E_F – энергетические уровни: критического движения, Ферми; W_M , $W_Π$ – работы выхода электронов и ионов из металла и полимера; δ_0 – толщина обогащенного (*б*) и обедненного (*в*) электронами слоя; χ – электронное средство

Указанное взаимодействие пар трения «металл-полимер» и определяет тип контакта и его энергетический уровень (рис. 10). При этом основной характеристикой энергетического уровня того или иного контакта является работа выхода электронов из подповерхностного слоя металлического обода тормозного шкива (W_M) и ионов, и электронов из подповерхностного слоя полимерной накладки ($W_Π$).

Фрикционные накладки ленточно-колодочного тормоза изготовлены из неоднородных материалов, в объеме которых сосуществуют аморфные и кристаллические фазы. В связи с этим, на межфазных границах происходит захват зарядов иного рода. Особенно это заметно при выгорании связующих компонентов из подповерхностного слоя полимерной накладки, что приводит к образованию жидких островков на ее поверхности. Жидкость является своего рода электролитом, сопротивление которого резко уменьшается в зависимости от степени его нагретости. Накапливание зарядов на границах обусловлено разницей в проводимостях рассматриваемых фаз (эффект Максвелла-Вагнера). При электризации такого материала носители будут или собираться вблизи данной межфазной границы, или наоборот, удаляться от нее в зависимости от того, какой из двух токов проводимости больше: притекающих к границе зарядов или уходящих от нее. Различия в локальных токах проводимости приводят также к диссипации зарядов при последующем проведении термостимулированных разрядов, так как в этом случае токи текут уже в противоположных направлениях [6].

Для процессов нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства контактов взаимодействия.

На рис. 10 условно показано различие между нейтральными, омическими и заблокированными контактами. Нейтральные контакты не препятствуют нейтрализации зарядов, поступающих из подповерхностного слоя металлического элемента трения в течение термостимулированного разряда. То же можно сказать и об омических контактах, хотя в этом случае добавляется возможность инжекции носителей противоположного знака внутрь заряженной поверхности накладки. Блокирующие контакты действуют противоположным образом: они препятствуют как инжекции, так и нейтрализации зарядов. Таким образом, если контакты заблокированы, нейтрализация должна протекать внутри металлического элемента трения независимо от вида контакта (является он инжектирующим электроны или блокирующим). Это зависит лишь от того, какая из работ выхода электронов или ионов больше: металлического или полимерного фрикционного элемента. Если работа выхода из первого элемента больше, чем со второго образуется блокирующий барьер. Наличие последнего позволяет изучать методом термостимулированного разряда полуизоляторы и полупроводники, которым свойственны большие токи проводимости.

Разрушение вторичных структур обоих типов локализуется на линиях (поверхностях) раздела основного материала пятен контактов микровыступов и сформированной новой фазы, в которой накапливаются неоднородности разного вида (рис. 11). В результате трансформации материалов поверхностных слоев структуры приспособляются к воздействиям различного рода полей. Одновременно формируется множество несоответствий между основными материалами и новой фазой, что приводит к ее разрушению и отделению.

Дискретность контакта и условия гидростатических удельных нагрузок в локальных поверхностных объемах слоев оказывают определенное положительное влияние (рис. 11, а, б, в), уменьшают интенсивность разрушения вторичных структур обоих типов за счет их упрочнения, препятствуют хрупкому разрушению вторичных структур II типа.

При разрушении путем соскальзывания пленок вторичных структур I типа (твердых растворов) (рис. 11, а) дискретность контакта обеспечивают общую высокую прочность поверхностей пятен микровыступов. Дискретность контактов

вызывает перемещение пленок (рис. 11, б), и как следствие, приводит к износу материалов на некоторых участках пятен микровыступов при допустимых условиях. На большей части поверхностей пятен контактов наблюдается перетекание пленок, способствующее их упрочнению, образованию субмикрорельефов, залечиванию микродефектов.

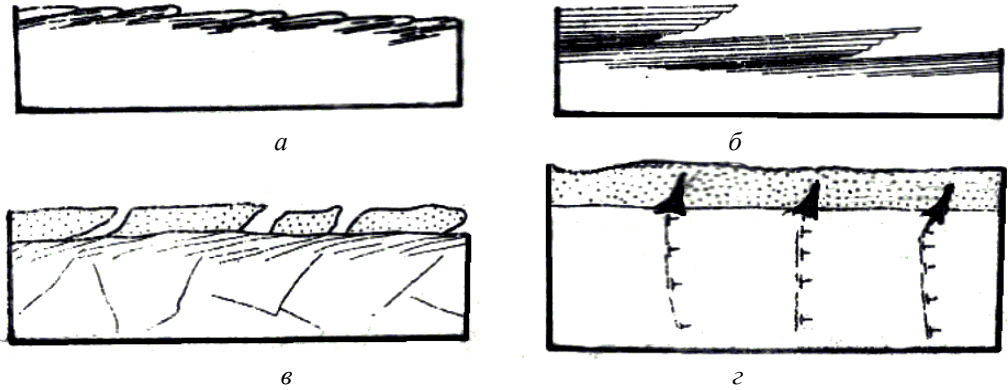


Рис. 11. Схемы разрушения вторичных структур I (а, б) и II (в, з) типов

При разрушении вторичных структур II типа (рис. 11, в, з) дискретность контакта препятствует накоплению множества несоответствий, способствует релаксации волн напряжений и дефектов, и как следствие, разрушению. При этом микротрещины пленок вторичных структур II типа, в основном, ориентированы почти перпендикулярно к поверхности фрикционного взаимодействия, благодаря трибозффекту.

Установление концентрации волн напряжений на переднем крае заблокированной полосы скольжения была отмечена Зинером, предложившим на этой основе модель зарождения трещины (рис. 12). Оперирование заблокированной полосой скольжения совместно с различными типами контактов пятен микровыступов (стрелками показано направление движения потоков энергии).

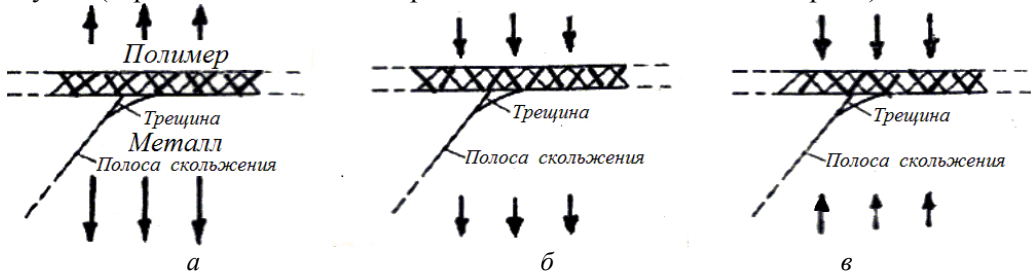


Рис. 12. Модель зарождения трещин в заблокированной полосе скольжения в паре трения «металл-полимер» с различными типами контактов: а – блокирующим; б – инжектирующим; в – нейтральным

Из рис. 12 следует, что наибольшая трещина будет зарождаться в нейтральном контакте, средняя трещина – в инжектирующем контакте и минимальная трещина – в блокирующем контакте. Исходя из выполненных исследований можно сделать вывод о том, что трещины зарождаются и развиваются при росте энергетической нагруженности пятен контактов микровыступов.

Выводы. Таким образом, показана энергонагруженность металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза и оценены максимальные сжимающие

напряжения, действующие на рабочую поверхность обода шкива и раскрыта природа зарождения и развития трещин в его поверхностном и подповерхностном слоях при росте энергетической нагруженности пятен контактов микровыступов.

Список литературы

1. Джанахмедов А.Х. Нефтяная трибология / А.Х. Джанахмедов – Баку: Элм, 2003. – 326 с.
2. Трение, износ и смазка / Под. общ. редакцией А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
3. Поверхностная прочность материалов при трении / Под. общ. редакц. Б.И. Костецкого. – Киев: Техника, 1976. – 296 с.
4. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева – М.: Наука, 2001. – 478 с.
5. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
6. Диплом №444 на открытие «Явление тепловой стабилизации в металлополимерных парах трения» от 18.01.2013г. авторов А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко. – М.: Международ. академ. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А-558 от 05.09.2012 г.
7. Контактно-импульсное взаимодействие материалов типа «металл-металл» и «полимер-полимер» в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, С.И. Крыштопа, Д.Ю. Журавлев, Н.М. Стебелецкая // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2013. – №5(2). – С.29 – 41.
8. Темпы нагревания металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты в ленточно-колодочном тормозе / А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко, Н.М. Стебелецкая // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – №2(61). – 2013. – С.20–30.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2014.

*Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, М. О. ВОЛЬЧЕНКО, Е. А. ДЖАНАХМЕДОВ, М. В. КИНДРАЧУК,
А.В. ВОЗНИЙ, С.П. КРАСІН*

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ЗНОС І РУЙНУВАННЯ ОБОДІВ ГАЛЬМІВНИХ ШКІВІВ БУРОВИХ ЛЕБІДОК (частина перша)

Проілюстрована енергонавантаженість і електротермомеханічний знос робочих поверхонь ободів гальмівних шківів бурових лебідок і розкрита природа зародження і розвитку тріщин на поверхні і в приповерхневому шарі обода гальмівного шкива.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, шків з ободом, процес нагрівання і вимушеного охолодження, електричні та теплові струми, електротермомеханічне тертя і знос, зародження і розвиток тріщин, стискаючі, розтягуючі і залишкові напруження.

D. O. VOLCHENKO, M. O. VOLCHENKO, E. A. DZHANAHMEDOV, M. V. KINDRACHUK, A. V. VOZNYI, S. P. KRASIN

ELECTRO-MECHANICAL WEAR AND DESTRUCTION OF RIM OF BRAKE PULLEYS OF DRAW-WORKS (part one)

We've illustrated energy-loading and electric-thermal-mechanical wear of work surfaces of rim of brake pulleys and disclosed the nature of the occurrence and development of cracks on the surface and in the subsurface layer of rim of brake pulley.

Keywords: band-block brake, pulley and rim, process heating and forced cooling, electrical and thermal currents, electric-thermal-mechanical friction and wear, occurrence and development of cracks, compressive, tensile and residual stresses.

Вольченко Дмитро Олександрович – д-р техн. наук, професор кафедри розробки нафтових та газових родовищ.

Вольченко Микола Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства та автосервісу Кубанського державного технологічного університету.

Джанахмедов Ельмар Ахад огли – провідний спеціаліст Державної нафтової компанії Азербайджанської республіки.

Кіндрачук Мирослав Васильович - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету.

Возний Андрій Володимирович – аспірант кафедри Механіки машин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Красін Сергій Петрович – аспірант кафедри матеріалознавства та автосервісу Кубанського державного технологічного університету.