

01.02.06
137

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

137

ПЛАГОВ АНДРЕЙ ИОСИФОВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
С ЭЛАСТОМЕРАМИ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 01.02.06 - Динамика и прочность
машин, приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

1992

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор И.Я.Березин
Научный консультант кандидат технических наук,
доцент Е.Е.Рихтер

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Л.А.Шефер
кандидат технических наук,
В.Г.Масленников

Ведущая организация: Производственное объединение
Челябинский тракторный завод

Защита состоится 28 октября 1992 г.

на заседании специализированного Совета Д 053.13.01 Челябинского государственного технического университета по адресу:
454080, г.Челябинск, проспект Ленина,76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 25 сентября 1992 г.

Ученый секретарь специализированного Совета,
кандидат технических наук, доцент



В.М.Кононов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В конструкциях современных машин широкое применение находят детали с эластомерами. Это обусловлено рядом достоинств резины, как конструкционного материала, к числу которых относятся эластичность, высокая энергоемкость, демпфирующие и звукоизоляционные свойства, стойкость к воздействию физических и химических факторов. Благодаря упомянутым свойствам достигается снижение динамической нагруженности узлов и агрегатов, уменьшение шума и вибраций, повышение надежности и долговечности машин.

Детали с эластомерами в виде упругих звеньев, виброизоляторов, демпферов, элементов приводных муфт, защитных покрытий и футеровок, транспортёрных лент и приводных ремней, подшипников и т.д. применяются в различных отраслях, таких как транспортное машиностроение, авиация и судостроение, горнодобывающая промышленность, сельхозмашиностроение и многих других.

Проблеме прогнозирования и обеспечения надежности деталей с эластомерами посвящено большое количество работ. Вопросам разработки теории и методов расчета конструкций с эластомерами посвящены исследования В.Л.Бидермана, Б.М.Горелика, С.И.Дымникова, В.И.Дырды, Э.Э.Лавендела, В.Н.Потураева, и других авторов. Значительный вклад в дальнейшее совершенствование и развитие прикладной теории и расчетно-экспериментальных методов, а также создание перспективных конструкций с эластомерами внесли Б.А.Абрамов, В.П.Абрамов, А.А.Благодаров, С.Е.Бурцев, Е.А.Вабилов, В.А.Варчев, Ю.В.Глухова, В.М.Гончаров, В.А.Дружинин, А.Л.Зигельман, Ю.Н.Истомин, Г.И.Каложный, Г.С.Клитеник, Г.В.Мазепа, В.Г.Масленников, В.Ф.Платонов, Н.С.Попов, В.И.Поткин, В.Б.Проскураков, А.С.Развалов, Н.А.Толчинский, В.В.Шаповалов, Б.П.Шичков, Г.С.Яковлев и другие.

В машинах с интенсивными технологическими процессами проблема обеспечения надежности деталей с эластомерами приобретает особую сложность. Это обусловлено тем, что тепловое состояние и долговечность деталей с эластомерами в этом случае определяется четырьмя взаимосвязанными процессами, такими как:

- интенсивное циклическое деформирование;
- зарождение гистерезисного тепла в объеме резинового массива;

- теплообмен с окружающей средой и формирование температурного поля в резиновом массиве;

- разрушение эластомера, вследствие совместного воздействия механических нагрузок и температуры.

В связи с этим в диссертации предпринимается попытка разработки комплексного подхода к проблеме прогнозирования надежности деталей с эластомерами в условиях интенсивного циклического нагружения. Реализация подхода выполнена на примере тяжело нагруженных узлов ходовой части быстроходных транспортных машин.

Как показывает опыт массовой эксплуатации гусеничных транспортных машин до 40% из общего числа отказов приходится на их ходовую часть. При этом элементами, ограничивающими ресурс машины, в первую очередь являются массивные шины опорных катков и резинометаллические шарниры гусениц, надежность которых при эксплуатации машин в условиях жаркого климата значительно снижается; после определенной наработки их разрушение становится лавинообразным. ЦЕЛЬЮ данной работы является: создание комплексной расчетно-экспериментальной методики, позволяющей на ранних этапах проектирования и освоения новых изделий прогнозировать и обеспечивать требуемый ресурс деталей с эластомерами путем моделирования процессов динамического нагружения, саморазогрева и повреждения, на основе обобщения и развития прикладной теории и методов расчета конструкций с эластомерами. При выполнении работы решались следующие задачи:

- экспериментальное определение в условиях реальной эксплуатации нагруженности массивных шин опорных катков и резинометаллических шарниров гусениц; разработка математических моделей для описания динамических процессов в разнообразных условиях эксплуатации;

- разработка экспериментальных методов определения характеристик диссипации энергии в деталях с эластомерами;

- разработка методики исследования процессов теплозарождения и теплообмена в деталях с эластомерами и прогнозирования их теплового состояния;

- создание методики прогнозирования долговечности деталей с эластомерами по критериям усталостного и термомеханического разрушения, разработка практических рекомендаций по обеспечению

требуемого ресурса резинометаллических шарниров и массивных шин. НАУЧНАЯ НОВИЗНА диссертации заключается в разработке комплексного подхода к задаче прогнозирования и обеспечения надежности деталей с эластомерами, в котором последовательно рассматриваются взаимосвязанные процессы эксплуатационной нагруженности, диссипации энергии, теплообмена и разрушения. В частности:

- в процессе исследований получены новые экспериментальные данные о кинематических и динамических процессах в системе "грунт-гусеница-каток" и на их основе разработаны математические модели, адекватно описывающие динамику системы при различных режимах и условиях эксплуатации;

- созданы стендовые установки и методики для определения характеристик теплозарождения в натуральных деталях и конструктивно подобных объектах; обоснованы расчетные модели для описания процесса диссипации энергии в деталях с эластомерами;

- выполнены исследования влияния реальных условий эксплуатации быстроходных гусеничных машин на тепловое состояние массивных шин опорных катков;

- обоснована эффективность применения энергетического критерия разрушения к прогнозированию долговечности резинометаллических шарниров; разработаны методики, позволяющие прогнозировать работоспособность конструкций в условиях усталостного, термомеханического и смешанного механизмов повреждения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Работы, на которых базируется данная диссертация, выполнялись по заказам промышленности; они были включены в план научно-технической программы "Надежность" (п.п. 11.03.Н1а, 11.03.Н2а, 11.03.Н2б), Координационный план научно-исследовательских работ вузов в области механики (п.п. 2.3.3, 2.9.2, 2.9.3, 2.9.5) и планы работы отраслевого министерства на 1985 - 1990 гг.

Применение разработанного подхода на ранних стадиях проектирования позволяет существенно снизить затраты и сроки освоения новых изделий за счет сокращения объемов стендовых и натуральных испытаний опытных образцов.

Разработанные установки и методики позволяют объективно обосновывать выбор рецептуры опытных марок резины.

Лабораторные исследования показали, что применение перспективных марок резины и рациональных конструктивных решений позволяет снизить характеристики диссипации энергии в 1.3 - 1.5 раза и в 1.5 - 2 раза повысить усталостную долговечность деталей. Результаты работы использованы рядом головных предприятий отрасли: Конструкторским бюро транспортного машиностроения (г. Омск), Екатеринбургским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института эластомерных материалов и изделий, Всероссийским научно-исследовательским институтом технического углерода (г. Омск).

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ. Основные положения работы были доложены и обсуждались на международных и региональных научно-технических конференциях: в Риге (1989, 1992 гг), Барнауле (1987 г.), Свердловске (1988 г.), Кутаиси (1990 г.), Челябинске (1991 г.).

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников (100 наименований) и приложения. Она изложена на 103 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 5 таблиц.

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ДЕТАЛЕЙ С ЭЛАСТОМЕРАМИ В ХОДОВЫХ СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

В процессе движения гусеничной машины резинометаллические шарниры гусениц и шины опорных катков испытывают интенсивное механическое нагружение, определяемое динамическим взаимодействием элементов ходовой части транспортной машины с грунтом.

Для обоснования модели, описывающей динамику системы "грунт-гусеница-каток" был проведен цикл экспериментальных исследований в условиях реальной эксплуатации гусеничной машины класса 40 т.

Разработанный комплекс измерительных устройств и аппаратуры, позволил регистрировать во время движения гусеничной машины следующие параметры: ускорения и перемещения оси опорного катка, углы относительного поворота траков в участке гусеничной цепи, положение катка относительно траков. Анализ результатов экспериментов позволил выявить ряд важных закономерностей, таких

как зависимости амплитуд ускорений и перемещений оси опорного катка, углов поворота траков от скорости движения машины и жесткости дорожного полотна.

Выявленные зависимости позволили обосновать модель взаимодействия в виде системы с 12-ю степенями свободы, учитывающую нелинейные упругие и вязкие свойства грунта, шины и резинометаллических шарниров, массы и моменты инерции катка и участка опорной ветви гусеницы, характер контактного взаимодействия шины и беговой дорожки гусеницы (рис.1). Дифференциальные уравнения движения системы "грунт-гусеница-каток" в матричном виде записываются следующим образом:

$$m_k \ddot{x}_k = const;$$

$$m_k \ddot{y}_k = -P_{ст} - m_k g + P_{конт}^y;$$

$$[M_{тр}] [\ddot{q}] = [C] [q] - [\mu] [\dot{q}] - [P_{конт}],$$

где $M_{тр}$ - матрица масс и моментов инерции траков, $[q]$ - вектор-столбец обобщенных координат траков: углов поворота и вертикальных смещений, $[P_{конт}]$ - вектор-столбец моментов и вертикальных составляющих контактных усилий, действующих на траки, $[C]$, $[\mu]$ - матрицы жесткости и вязкости, описывающие связи, наложенные на траки.

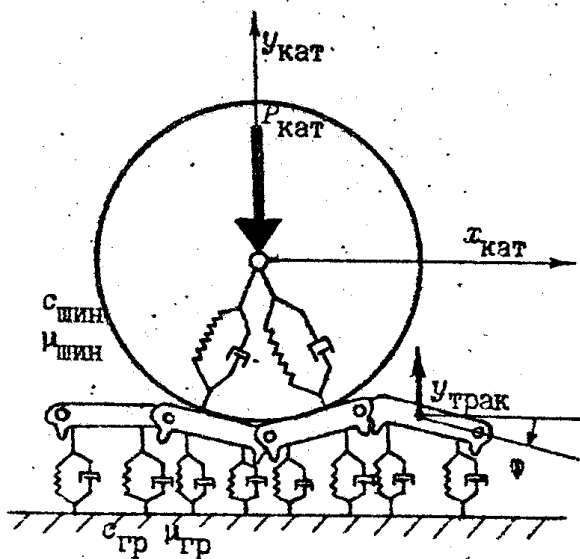


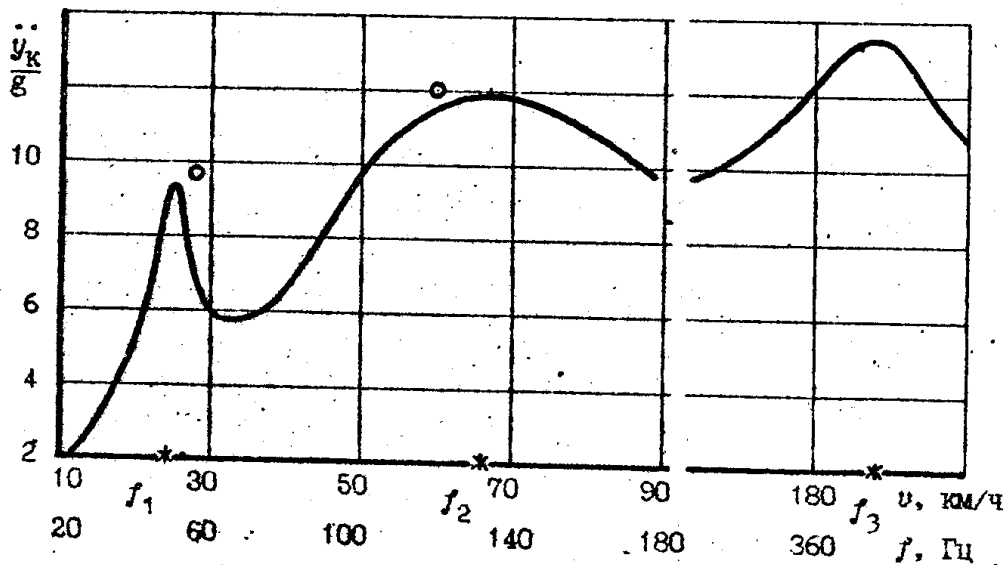
Рис.1. Модель системы "грунт-гусеница-каток"

Решение этой системы проведено численным методом прогноза и коррекции. Параметры модели определялись из условия совпадения расчетных графиков и экспериментальных осциллограмм.

Адекватность модели была подтверждена путем сопоставления

полученных зависимостей с известными экспериментальными данными (рис.2). С помощью указанной модели была исследована динамика системы "грунт-гусеница-каток", описано явление "бегущей волны в гусенице", изучено влияния различных параметров на нагруженность элементов ходовой системы. На рис.2 показана расчетная зависимость перегрузок на оси катка от скорости движения, на которой ясно видно наличие трех резонансных зон. Анализ собственных частот системы показал, что первая частота соответствует собственным колебаниям массы катка на упругой шине, две другие обусловлены угловыми и вертикальными колебаниями гусеничной цепи на грунте. Выявленная закономерность позволяет объяснить отмечаемый многими экспериментаторами эффект повышения ускорений при повышенных скоростях движения гусеничных машин.

Результаты расчета механических нагрузок при помощи модели "грунт-гусеница-каток" представляют не только самостоятельный интерес, но также необходимы для последующего определения теплового состояния и долговечности деталей с эластомерами.



○ - экспериментальные данные из литературных источников
 Рис.2. Резонансные зоны системы "грунт-гусеница-каток"

3. ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ДЕТАЛЯХ С ЭЛАСТОМЕРАМИ

Определение характеристик теплотворения в деталях с эластомерами является необходимым этапом в их исследовании, так

как их работоспособность во многих случаях определяется тепловым состоянием.

Известны два подхода к рассматриваемой проблеме.

Первый предполагает использование на начальном этапе аналитических или численных решений задачи вязкоупругости с целью определения характеристик процессов изменения напряженно-деформированного состояния; на втором этапе полученные решения используются для определения величины и распределения мощности внутренних источников тепла в объеме материала; необходимые вязко-упругие параметры материала, определяются путем лабораторных испытаний образцов.

Другой подход предполагает стендовые испытания натуральных объектов в режимах, близких к эксплуатационным. При этом осуществляется регистрация непосредственно характеристик диссипации энергии в исследуемой конструкции.

В данной работе сделана попытка соединить достоинства обоих подходов, уменьшив, по возможности, их недостатки. Предложено на специальных установках проводить исследования диссипации энергии в конструктивно подобных объектах. При этом должно быть выполнено основное положение подхода: удельная энергия диссипации в модели и в реальной конструкции равны, если процессы изменения их напряженно-деформированных состояний будут одинаковы.

$$\frac{\Delta W}{V} = idem \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} (e(t)) = idem \\ (\dot{e}(t)) = idem \end{cases}$$

Определение диссипативных и реологических свойств деталей с эластомерами осуществлено путем регистрации петли гистерезиса в терминах усилие - перемещение. Последующая обработка данных лабораторного эксперимента позволяет получить вязко-упругие характеристики реальных конструкций.

Нагружение образцов, конструктивно подобных шинам в масштабе 1:10, выполнено на вибростенде ВЭДС-200 со специальной оснасткой, позволяющем варьировать амплитуду и частоту нагружения в рабочем интервале значений. Натурные образцы резинометаллических шарниров испытывались на модифицированном стенде ВР 155. Для измерения параметров петли гистерезиса использовались датчики усилий и перемещений, оперативная обработка информации выполнялась с помощью специально разработанного микропроцессорного прибора "Ранг".

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что поведение рассматриваемых конструкций адекватно описывается моделями вязко-упругого тела типа Кельвина. Параметры моделей определены на основе обработки данных базовых опытов с использованием методов идентификации.

Разработанная методика применена для сравнительных исследований ряда резинометаллических втулок из резин серийной и опытных марок; даны рекомендации по рациональному выбору рецептуры резины. На основе изучения кинетики петли гистерезиса получены зависимости энергетических параметров втулок от наработки. Так показано наличие трех характерных участков: приработки, стабилизации и интенсивного накопления повреждений. Установлено, что на участке, предшествующем разрушению детали имеет место резкое снижение полной энергии деформирования W и возрастание удельной энергии деформации ΔW , коэффициента поглощения ψ и температуры в резиновом массиве. Упомянутые закономерности иллюстрируются на рис. 3 для резины ИРП 1393-8 на основе каучука СКИ-3.

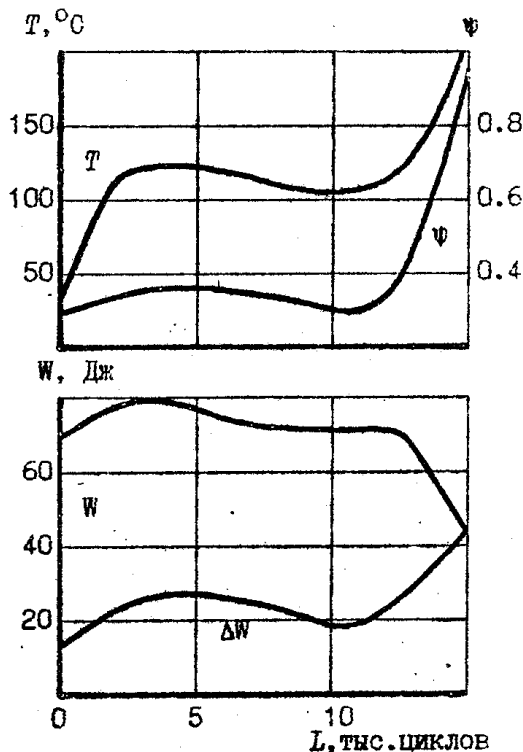


Рис.3.

Одним из наиболее важных результатов является установление тесной связи между долговечностью втулок и удельной энергии диссипации за цикл ΔW в начале испытаний. Указанная зависимость иллюстрируется диаграммами на рис.4. Выявленная закономерность положена в основу рекомендованной методики экспресс-анализа качества резинометаллических шарниров в условиях массового производства.

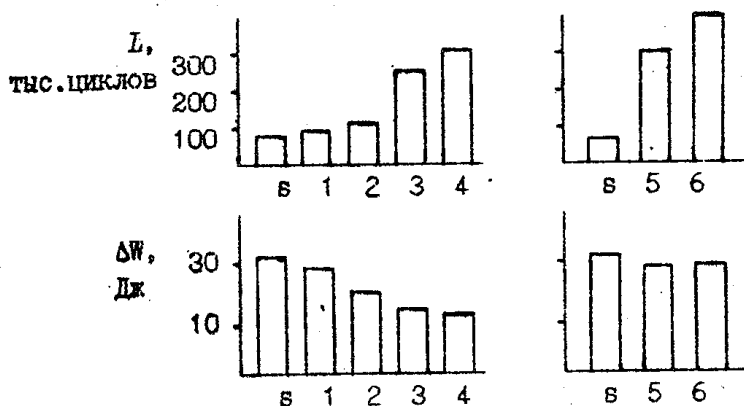


Рис.4. Сравнение результатов испытаний втулок серийной (s), из опытных марок резины (1-4) и опытных конструкций (5,6).

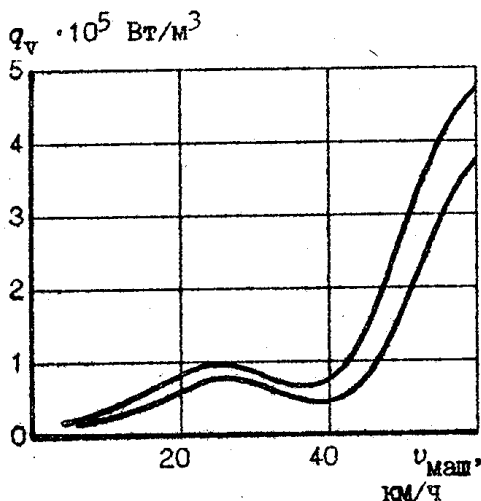


Рис.5.

На рис.5 приведены зависимости удельной мощности тепловыделения в шине опорного катка q_v при движении гусеничной машины по дорогам с различной жесткостью дорожного полотна от скорости движения. Максимум графиков в области 25 км/ч соответствует резонансу по первой форме колебаний, а резкое возрастание q_v при скоростях свыше 50 км/ч обусловлено приближением к резонансу по второй форме.

Полученные на основе разработанной методики характеристики теплозарождения в последующем используются в задаче распределения температур в резиновых массивах деталей.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ДЕТАЛЯХ С ЭЛАСТОМЕРАМИ

Для расчета температурных полей в объеме резиновых массивов деталей использованы уравнения теории теплообмена, в которых члены, описывающие мощность внутренних источников тепла, представляют собой характеристики теплозарождения, полученные по описанным ранее методикам.

Граничные условия отображают характер взаимодействия деталей с окружающей средой и сопряженными элементами. Так на свободной поверхности шин опорных катков происходит конвективный теплообмен с воздушным потоком (граничные условия III рода), а на поверхности контакта шины с диском катка происходит теплообмен путем теплопроводности (граничные условия IV рода). Применительно к опорному катку граничные условия имеют вид:

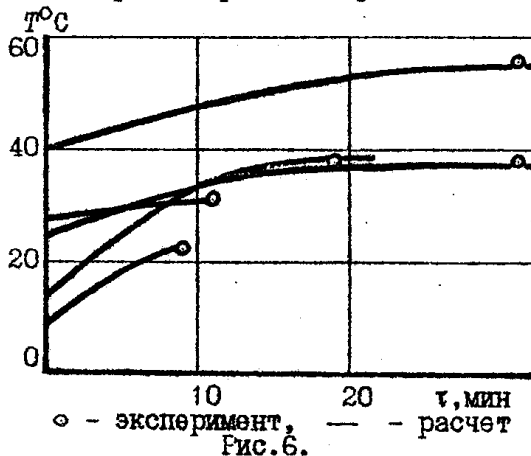
$$\begin{aligned}
 \lambda_p \frac{\partial T}{\partial n} &= \lambda_d \frac{\partial T}{\partial n} && \text{на границе резина - диск} \\
 &&& \text{при } r = R_d \\
 < \lambda_p \frac{\partial T}{\partial n} &= \alpha_{p-v} (T_p^{\circ} - T_v) && \text{на границе резина - воздух} \\
 &&& \text{при } R_d \leq r \leq R_k \quad (3.3) \\
 \lambda_p \frac{\partial T}{\partial n} &= \alpha_{d-v} (T_d^{\circ} - T_v) && \text{на границе диск - воздух} \\
 &&& \text{при } 0 \leq r \leq R_d
 \end{aligned}$$

где T , T_p° , T_d° , T_v - температуры соответственно: в исследуемой точке, на поверхности резины и диска, окружающего воздуха, ρ_p , ρ_d - плотности резины и материала диска (стали); λ_p , λ_d - коэффициенты теплопроводности резины и материала диска; c_d , c_p - теплоемкости резины и материала диска; q_v - удельная мощность внутренних источников тепла в резине; α_{p-v} , α_{d-v} - коэффициенты теплоотдачи со свободной поверхности резины и диска; r , R_d , R_k - радиусы соответственно: текущий, диска, наружный радиус катка.

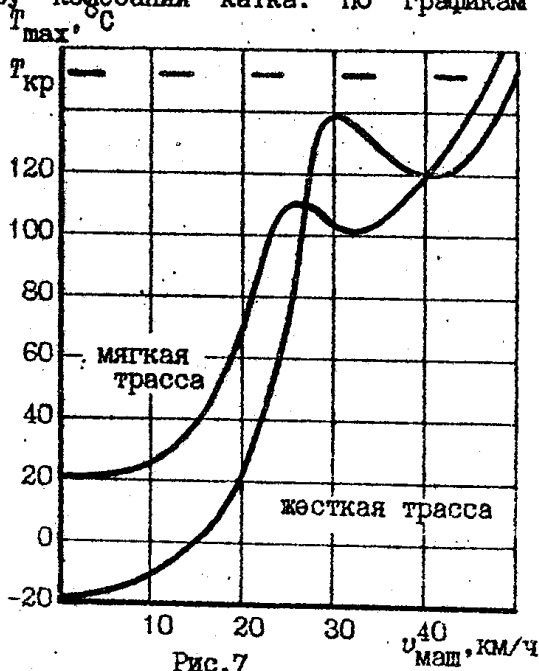
Коэффициенты теплоотдачи определялись с помощью методов теории подобия. В рассматриваемом случае граничные условия приближенно соответствуют коридорному пучку параллельных цилиндров, омываемых турбулентным потоком воздуха. Число Рейнольдса для скоростей обдува, соответствующих скорости движения машины равно $2 \cdot 10^5$. Для таких граничных условий $Nu_d = 0.021 Re_d^{0.84} Pr_d^{0.36}$, где $Nu_d = \alpha d / \lambda$ - число Нуссельта, определяющее средний коэффициент теплоотдачи со свободной поверхности конструкции; α - средний коэффициент теплоотдачи; d - характерный размер конструкции, в данном случае диаметр катка; λ - коэффициент теплопроводности теплоносителя (воздуха); Re_d - число Рейнольдса, Pr_d - число Прандтля.

Уравнения теплообмена для тел сложной формы решаются численно. Наиболее эффективные расчетные методы для определения температурных полей это метод конечных элементов и метод балансов энергий. В работе использовались оба метода для сравнения и повышения точности правильности вычислений.

На основе полученных данных о мощности внутренних источников тепла были проведены расчеты стационарных температурных полей в шинах опорных катков и кинетики их нагрева. Сравнение результатов расчетов с полученными ранее экспериментальными данными, показало их хорошую сходимость (рис.6). Этот факт особенно важен, поскольку подтверждает адекватность разработанного подхода включающего этапы определения эксплуатационных нагрузок, характеристик диссипации энергии и расчета температурного поля.



На рис.7 показаны расчетные зависимости максимальных температур в шине в зависимости от условий движения. Максимумы на графиках соответствуют резонансу колебаний катка. По графикам видно, что при движении по трассе с жестким грунтом интенсивность тепловыделения выше, чем на мягкой трассе настолько, что даже при более низких температурах окружающего воздуха в шине достигаются более высокие температуры. Эти расчеты дают объяснение описанному в литературе эффекту большего нагрева шин опорных катков зимой при движении по мерзлому грунту, чем при эксплуатации гусеничной машины на значительно более мягкой трассе летом.



Таким образом, разработана методика прогнозирования теплового состояния деталей с эластомерами. При этом учитываются условия

нагрузки, условия теплоотдачи - обдув и температура воздуха, а также теплофизические характеристики материалов. В последующем данная методика используется для оценки долговечности деталей.

5. ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ С ЭЛАСТОМЕРАМИ

Проведенный сравнительный анализ показывает, что наиболее перспективным для конструкций с эластомерами является энергетический критерий разрушения диссипативного типа, постулирующий, что система переходит в предельное состояние, если энергия разрушения достигнет некоторого критического значения. Энергия разрушения определяется экспериментально как разность между полной энергией диссипации и энергией, выделившейся в виде тепла:

$$W_p^* = \int_0^{\tau^*} (\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{W}_T) dt$$

Это положение было подтверждено результатами ресурсных испытаний резинометаллических втулок. Полная энергия диссипации определялась по петле гистерезиса, а часть энергии, выделявшаяся в виде тепла, фиксировалась калориметрическим методом на специальном стенде. Получены зависимости энергетических параметров от наработки (рис.8). Установлено что, величина тепловой энергии (ΔW_T) составляет 70-85% от энергии диссипации (ΔW), поэтому для эластомеров такой метод определения энергии разрушения оказывается достаточно достоверным.

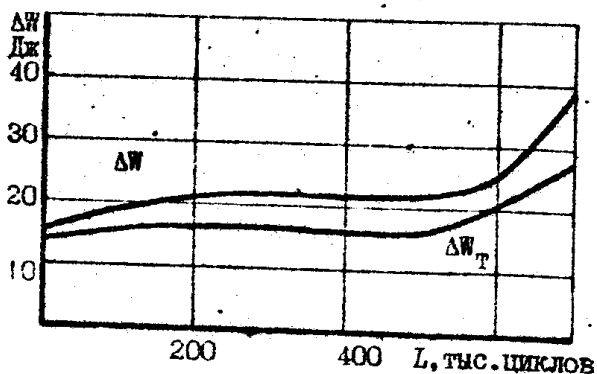


Рис.8.

Полученное критериальное значение энергии разрушения (W_p^*) оказалось зависимым от температуры нагрева и механизма разрушения, и оказывается постоянным только при усталостном разрушении (рис.9). В интервалах, соответствующих механизмам

термомеханического и смешанного разрушения значения (ΔW_p^*) подчиняются определенной закономерности.

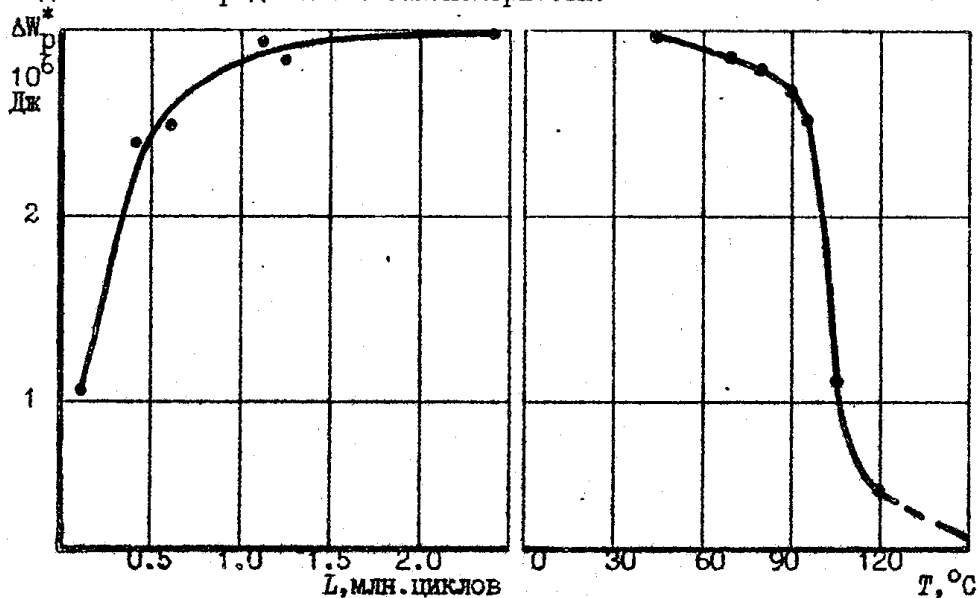


Рис.9.

С использованием полученных результатов были проведены расчеты долговечности резинометаллических шарниров гусениц в эксплуатации (рис. 10).

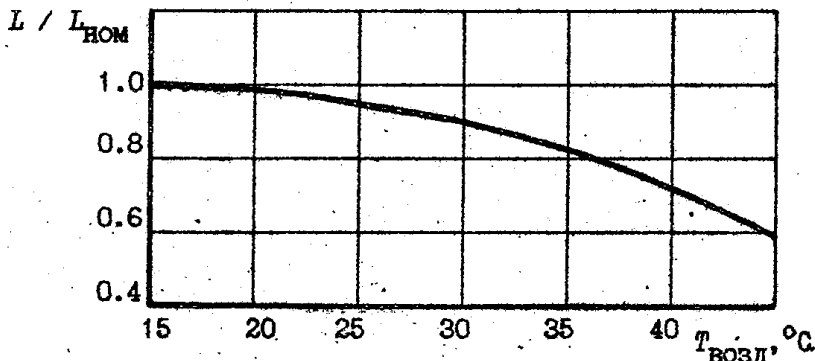
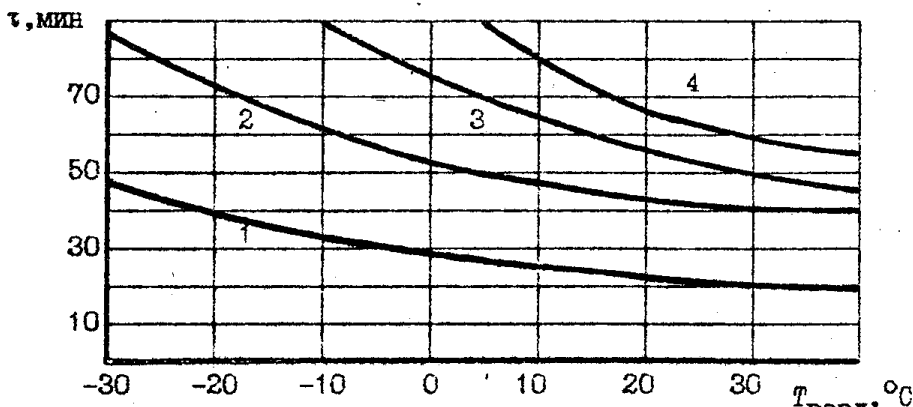


Рис.10. Средняя долговечность шарниров при $v_{маш} = 36$ км/ч.

По данным массовой эксплуатации известно, что наиболее опасным видом разрушения шин опорных катков является отслоение по клеевому слою вследствие перегрева. Поэтому целесообразно вести расчет долговечности шин опорных катков по критерию достижения критической температуры в шине. По результатам расчета температурных полей построена номограмма для определения времени

достижения $T_{кр}$ в максимально нагретой точке шины в зависимости от условий и режимов эксплуатации быстроходных гусеничных машин (рис.11).



1 - жесткая трасса, $v_{маш} = 50$ км/ч; 2 - мягкая трасса, $v_{маш} = 50$ км/ч;
 3 - жесткая трасса, $v_{маш} = 30$ км/ч; 4 - жесткая трасса, $v_{маш} = 40$ км/ч.

Рис.11.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе разработаны элементы прикладной теории, инженерные методы, лабораторные установки и соответствующее математическое обеспечение, комплекс которых обеспечивает реализацию единого подхода для прогнозирования эксплуатационной нагруженности, диссипации энергии, теплового состояния и долговечности деталей с эластомерами.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Экспериментально изучены динамические процессы в системе "грунт-гусеница-каток" в условиях реальной эксплуатации, обоснован вид математической модели и определены ее параметры. Выявлен ряд характерных эффектов, в частности, явление "бегущей волны" и наличие трех резонансных зон, обусловленных колебаниями опорных катков и гусеницы на грунте. Показано, что первопричиной динамической нагруженности шин опорных катков является кинематическое возбуждение от бегущей волны в гусенице. В диапазоне эксплуатационных скоростей исследуемого объекта резонансные зоны лежат в районе 25 и 70 км/ч. При этом изменение жесткости дорожного полотна в интервале соответствующем пахоте и дороге с бетонным покрытием приводит к существенному, в 1,5 - 2

раза, повышению динамических нагрузок на шины опорных катков и снижению амплитуд углов закрутки резинометаллических шарниров в опорной ветви гусеничного обвода в 2 - 3 раза. Применение разработанной модели позволяет на ранних этапах проектирования прогнозировать эксплуатационную нагруженность различных конструктивных вариантов деталей в широком диапазоне режимов и условий эксплуатации.

2. Разработаны методики и созданы стендовые установки для определения характеристик диссипации энергии в натуральных и конструктивно подобных образцах деталей с эластомерами. Результаты лабораторных исследований позволили обосновать обобщенную модель вязкоупругого тела с нелинейным вязким элементом для описания процессов диссипации энергии в резиновых массивах натуральных деталей в условиях реальной эксплуатации.

3. На основе решения задачи теплообмена разработана методика расчета температурных полей в шинах опорных катков. Выполнены расчетные исследования для различных условий эксплуатации. Установлено, что при эксплуатации гусеничных машин в районах с жарким климатом саморазогрев резиновых элементов достигает 140 - 200 град С. В этих условиях происходит смена усталостного механизма повреждения термомеханическим. Выявлен эффект "запирания тепла", обусловленный низкой теплопроводностью применяемых марок резины. Это обосновало направления работ в области создания новых видов эластомеров с направленной графитизацией. Адекватность разработанного подхода подтверждается соответствием расчетных и экспериментальных результатов полученных в условиях реальной эксплуатации.

4. Разработаны методика и специализированная аппаратура для лабораторного экспресс-анализа различных марок резин с точки зрения характеристик диссипации энергии, теплопроводности и температурного поля разнообразных конструкций резинометаллических шарниров гусениц.

5. Разработаны методики прогнозирования работоспособности деталей с эластомерами, в частности:

а). Показана возможность применения энергетического критерия для расчета долговечности деталей типа резинометаллических шарниров. Разработана методика экспериментального определения критериальных значений соответствующих усталостному, термомеханическому и смешанному механизмам повреждения. Показано хорошее согласование

расчетных функций надежности с данными массовой эксплуатации.

б). применительно к шинам опорных катков разработана методика прогнозирования их предельного состояния по температурному критерию, соответствующему условию термомеханического разрушения. Предложена номограмма для оценки работоспособности шин опорных катков в зависимости от режимов и условий эксплуатации быстроходных гусеничных машин (скорости движения, температуры воздуха, типа дорожного покрытия).

6. Наряду с расчетным анализом, выполняемым на ранних этапах проектирования, разработанные методы применяются также на стадии опережающей отработки конструкций для обоснованного выбора режимов стендовых испытаний.

7. Результаты работы использованы для обоснованного выбора параметров конструкций проектируемых изделий, создания перспективных марок резин для деталей ходовой части гусеничных машин рядом предприятий отрасли транспортного машиностроения: Конструкторским бюро транспортного машиностроения (г. Омск), Екатеринбургским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института эластомерных материалов и изделий, Всероссийским научно-исследовательским институтом технического углерода (г. Омск).

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Березин И.Я., Плягов А.И., Шаповалов В.В. Оценка интенсивности теплозарождения в резинометаллических узлах при произвольном циклическом нагружении // Прочность машин и аппаратов при переменных нагружениях: Темат. сборник научн. трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1986. - С. 45-49.
2. Березин И.Я., Плягов А.И., Рихтер Е.Е., Шаповалов В.В. Тепловое состояние и нагруженность РМШ гусениц в условиях реальной эксплуатации // Тез. докл. респ. научно-техн. конф. "Прочность, надежность и оптимальное проектирование резинометаллических соединений" г. Барнаул, 20-22 мая 1987 г. - Барнаул: АПИ, 1987. - С. 15-18.
3. Березин И.Я., Плягов А.И., Рихтер Е.Е. Определение характеристик теплозарождения в резинометаллическом шарнире // Отраслевой журнал, 1988. - № 11. - С. 25-27.
4. Кашкин П.В., Плягов А.И., Рихтер Е.Е., Шаповалов В.В. Методика и установка для ускоренных испытаний резинометаллических изделий // Тез. докл. респ. научно-техн. конф. "Разработка и применение

методов ускоренных испытаний продукции на надежность" 12-14 марта 1988 г. г. Ижевск.-Ижевск, 1988.-С.12-13.

5. Березин И.Я., Плагов А.И., Рихтер Е.Е. Инженерная методика оценки долговечности РМШ гусениц // Тез.докл. регион. научно-техн. конф. "Проблемы совершенствования гусеничных ходовых систем тракторов" 10-12 апреля 1989 г. г. Челябинск.-Челябинск: ЧФ НАТИ, 1989.-С.34-36.

6. Плагов А.И., Рихтер Е.Е. К вопросу об использовании диссипативного критерия разрушения для оценки долговечности резинометаллических шарниров //Динамика и прочность машин и конструкций : Темат. сборник научн. трудов.- Челябинск: ЧПИ, 1990.- С. 134-140.

7. Березин И.Я., Плагов А.И., Рихтер Е.Е. Оценка теплового состояния и надежности РМШ гусениц транспортных машин // Тез. докл. II респ. научно-техн. конф. "Динамика и прочность мобильных машин" г. Кутаиси, 18-19 окт. 1990 г.- Кутаиси, 1990.- С. 75-76.

8. Плагов А.И., Рихтер Е.Е. Оптимизация и информативность ресурсных испытаний резинотехнических изделий // Тез.докл. Всесоюз. научно-техн. конф. "Методы ускоренных стендовых испытаний агрегатов тракторов и сельскохозяйственных машин на надежность" 15-17 окт. 1991 г. г. Челябинск.- Челябинск: ЧФ НАТИ, 1991.-С.10-11.

9. Березин И.Я., Плагов А.И., Рихтер Е.Е. Расчетно-экспериментальная методика прогнозирования теплового состояния и ресурса деталей с эластомерами // Тез. докл. междунар. конф. "Методы расчета конструкций из высокоэластических материалов" 5-7 февр. 1992 г.- Латвия, Рига: РТУ, 1992.- С.25.

10. А.с. 259800 зарегистрировано 3.08.87., (в соавторстве)

А.с. 281943 зарегистрировано 1.09.88.,

А.с. 291854 зарегистрировано 1.04.89.,

А.с. 330680 зарегистрировано 1.10.91.

Подписано к печати 22.09.92. формат 60X90 I/16. Печ. л. I.
Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Заказ 209/544.

УОИ ЧТУ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.