

Рис. 4. Микротвердость стали 40X при различных скоростях перемещения источника нагрева.

УДК 629.113-192

Минюкович С.М., Шмелев А.В., Рубцов А.В.

НАГРУЖЕННОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КАРТЕРА ВЕДУЩЕГО МОСТА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Введение

При разработке и доводке несущих конструкций мобильных машин большое внимание уделяется их надежности и долговечности, тем более, если от этих показателей зависит безопасность эксплуатации транспортного средства. Экспериментальное определение циклической долговечности сложной конструкции, особенно в случае действия эксплуатационного нагружения, процесс дорогостоящий, а самое главное – длительный. Основная задача, которая стоит перед разработчиками на стадии подготовки к производству новых конструкций, это его сокращение. Один из вариантов решения этой задачи – применение расчетных методов прогнозирования усталостной долговечности с использованием данных по нагруженности конструкции в предполагаемых условиях эксплуатации и характеристик сопротивления усталости используемых материалов.

В данной работе рассматривается оценка параметров нагруженности и прогнозирование усталостной долговечно-

сти новой конструкции картера переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза на основании данных тензометрирования в типовых условиях эксплуатации.

Методика испытаний и расчет напряженно-деформированного состояния картера ведущего моста грузового автомобиля

Расчет напряженно-деформированного состояния картера моста, с применением метода конечных элементов, позволил выявить наиболее нагруженные зоны конструкции. Ими являются: места перехода кожухов полуосей картера («рукава» картера) в редукторную часть («банджо»), участки рукавов у фланцев, а также у основания рессорных площадок. Анализ результатов стендовых испытаний и эксплуатации аналогичных конструкций показал, что в указанных зонах имеют место усталостные разрушения. На основании этих данных были выбраны 12 мест установки тензодатчиков. Схема их расположения показана на рис. 1.

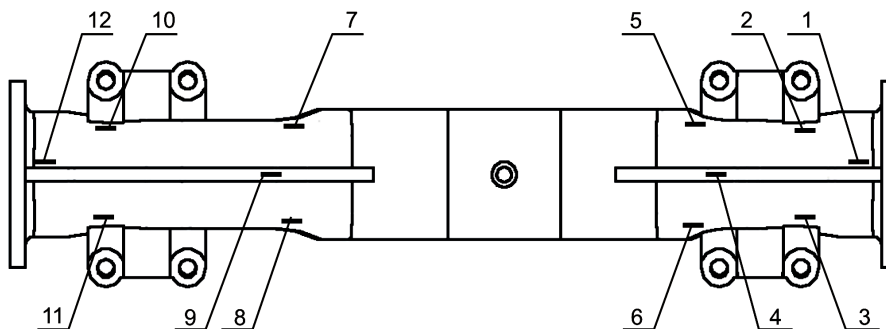


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на картере переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза (вид снизу)

Минюкович Сергей Михайлович, начальник испытательного центра РУП «МАЗ».
 Шмелев Алексей Васильевич, научный сотрудник НИРУП «Белавтотракторстроение».
 Рубцов Александр Владимирович, инженер-исследователь центра РУП «МАЗ».

Таблица 1. Статические составляющие растягивающих напряжений в картере переднего моста автомобиля-лесовоза

№ тензорезистора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Статическая составляющая напряжений, МПа	20	24	11	39	33	21	29	21	48	12	18	24

Для определения напряжений в исследуемых зонах использовались тензорезисторы марки 1-LY41-10/120 сопротивлением 120 Ом и базой 10 мм. Тензорезисторы располагались по направлению действия вектора главных напряжений.

Нагруженность картера в условиях эксплуатации определялась только для груженого состояния (как наиболее повреждающего). Поэтому перед началом испытаний, с помощью балластного груза, было обеспечено требуемое техническими условиями распределение веса по осям автомобиля. На данной стадии также определялись статические составляющие напряжений, возникающие в картере ведущего моста, под действием массы автомобиля и груза. Их значения приведены в таблице 1.

Дорожные испытания проходили в следующих типовых для автомобиля-лесовоза условиях:

- а) движение по асфальтированному покрытию в хорошем состоянии (ровный асфальт). Скорости движения: 50, 60, 70 км/ч;
- б) движение по асфальтированному покрытию в неудовлетворительном состоянии (разбитый асфальт). Скорости движения: 20, 30, 40 км/ч;
- в) движение по лесной грунтовой дороге в неудовлетворительном состоянии (грунтовая дорога). Скорость движения в диапазоне 20–30 км/ч.

Для каждого типа дорожного покрытия при фиксированном скоростном режиме выполнялось не менее трех заездов. Регистрация процессов нагружения осуществлялась одновременно по всем каналам с применением многоканальной цифровой системы сбора данных. Частота дискретизации процесса составляла 200 Гц. Учитывая, что собственная частота колебания подрессоренной массы автомобиля составляет $\approx 1-2,5$ Гц, а неподрессоренной массы (самого моста) $\approx 5-15$ Гц – этого вполне достаточно для описания реальных процессов изменения напряжений исследуемой конструкции [1, 2].

На рисунках 2 и 3 дано графическое описание распределения максимальных напряжений, возникающих в местах установки тензодатчиков, при движении по ровному и разбитому асфальтированному покрытию с различными скоростями. Эти величины определялись как средние значения максимальных напряжений по результатам всех заездов.

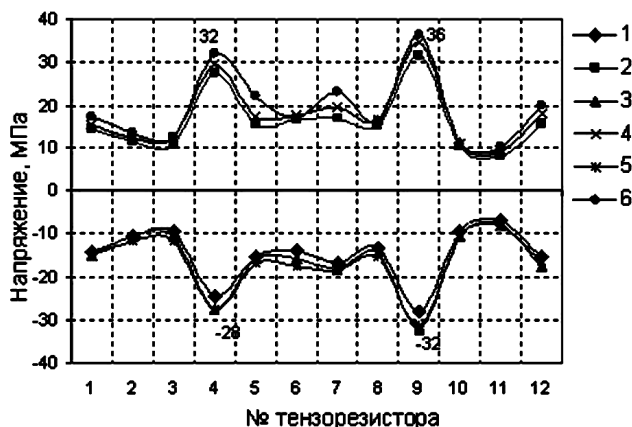


Рис. 2. Максимальные напряжения в картере переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза при движении по ровному асфальту:

- 1, 2 – со скоростью 50 км/ч (сжатие, растяжение);
- 3, 4 – со скоростью 60 км/ч (сжатие, растяжение);
- 5, 6 – со скоростью 70 км/ч (сжатие, растяжение)

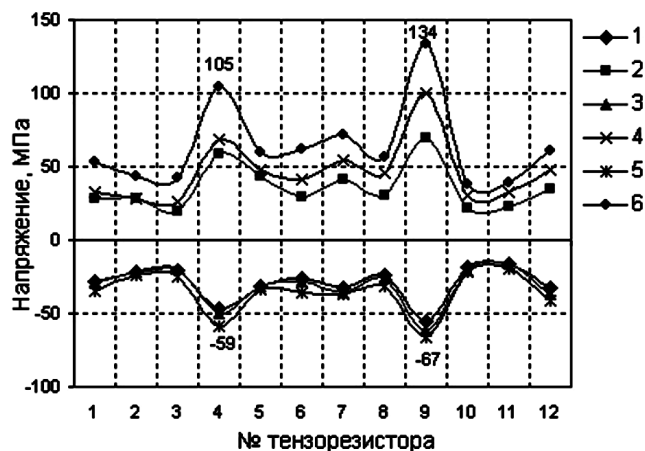


Рис. 3. Максимальные напряжения в картере переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза при движении по разбитому асфальту:

- 1, 2 – со скоростью 20 км/ч (сжатие, растяжение);
- 3, 4 – со скоростью 30 км/ч (сжатие, растяжение);
- 5, 6 – со скоростью 40 км/ч (сжатие, растяжение)

На рис. 4 приведено сравнение нагруженности по всем трем типам дорожных покрытий при максимальных скоростях движения во время испытаний.

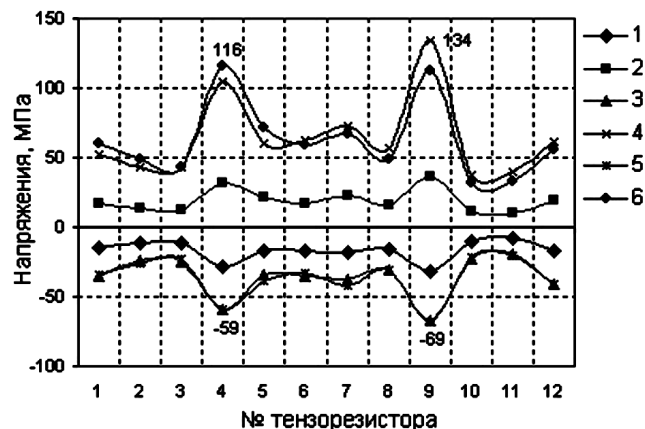


Рис. 4. Максимальные напряжения в картере переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза при движении в различных дорожных условиях:

- 1, 2 – ровный асфальт, скорость 70 км/ч (сжатие, растяжение);
- 3, 4 – разбитый асфальт, скорость 40 км/ч (сжатие, растяжение);
- 5, 6 – грунтовая дорога, диапазон скоростей 20-30 км/ч (сжатие, растяжение)

Напряжения на рисунках 2-4 даны без учета статических составляющих. Это не мешает судить об уровне нагруженности, соответствующему каждому режиму. Анализируя данные движения по ровному асфальту, можно сделать вывод, что увеличение скорости в рассматриваемом диапазоне скоростей на 10 км/ч вызывает повышение растягивающих напряжений в среднем на 10-15%. Для разбитого асфальта эта цифра составляет – 20-40%, но при значительно меньших скоростях.

При сравнении данных, представленных на рис. 4, очевидно, что наиболее сложные условия эксплуатации представляет собой движение по разбитому асфальту. Следует учесть, что скорость в данном случае составляла 40 км/ч, а при движении по грунтовой дороге – в диапазоне 20-30 км/ч.

Таблица 2. Характеристики сопротивления усталости стали 40Л

Коэффициент асимметрии цикла R	Предел выносливости σ_R , МПа	Характеристика угла наклона ν , МПа	Точка перегиба кривой усталости N_0
0	103,9	69,4	$0,54 \cdot 10^6$
-1	56,6	69,4	$0,54 \cdot 10^6$

ν – показатель наклона кривой усталости в полулогарифмической системе координат $\left(\nu = \frac{d\sigma}{d \ln N} \right)$

Таблица 3. Результаты прогнозирования усталостной долговечности

Режим нагружения	Номер заезда	Пробег, тыс. км	Средний пробег, тыс. км	Пробег при уровне доверительной вероятности 90%, тыс. км
движение по асфальтированному покрытию со скоростью 70 км/ч	1	*	*	*
	2	*		
	3	*		
	4	*		
движение по разбитому асфальтированному покрытию со скоростью 30 км/ч	1	90,4	101,7	77
	2	96,6		
	3	118,2		
движение по грунтовой дороге в скоростном диапазоне 20-30 км/ч	1	35,8	57,1	32
	2	92,3		
	3	53,3		
	4	28,7		
	5	75,6		

* для данного режима нагружения долговечность не лимитируется

Во всех случаях наиболее нагруженной зоной конструкции картера являлось место установки тензодатчика №9. Поэтому, следуя теории наиболее слабого звена, прогнозирование усталостной долговечности выполняется именно для этой зоны.

Картер моста изготовлен из стали 40Л. В работе [3] приведены характеристики сопротивления усталости образцов данного материала с учетом качества поверхности, особенности микроструктуры и технологии изготовления картера. Значения пределов выносливости были пересчитаны на 99% вероятность неразрушения, результаты приведены в таблице 2.

Данные характеристики сопротивления усталости, с достаточной для инженерных расчетов точностью, могут быть использованы для прогнозирования долговечности исследуемой конструкции [4].

Процессы изменения напряжений в конструкции картера носят случайный характер, так как вызваны воздействиями со стороны дорожного полотна. Они имеют достаточно сложную структуру, одной из характеристик которой является коэффициент нерегулярности [5]. Для всех зарегистрированных процессов нагружения, независимо от дорожных условий, его значение находится в диапазоне 0,07-0,12. Это определило выбор метода схематизации. Был использован метод полных циклов, который позволяет достаточно точно описать сложные, нерегулярные процессы нагружения, и рекомендуется рядом источников [5-7].

Следующим важным моментом при обработке процессов нагружения являлся учет влияния переменной асимметрии цикла. Поэтому вместе с методом полных циклов было использовано приведение асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным. Для циклов с максимальным напряжением выше предела выносливости, при текущем коэффициенте асимметрии цикла ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$), использовался метод, предложенный в источнике [4]. Согласно этому методу, эквивалентная по повреждению амплитуда симметричного цикла напряжений вычисляется на основе диаграммы предельных амплитуд Киншошвили-Серенсена с использованием выражения:

$$\sigma_s = b \cdot \sigma_{\max} - (a \cdot b - 1) \cdot \sigma_{-1}, \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости при симметричном нагружении ($R=-1$); σ_{\max} – максимальное напряжение цикла процесса; Ψ – коэффициент чувствительности к асимметрии нагружения;

$$b = \frac{\nu_2}{\nu_R} = 1 / \left[\frac{\nu_1}{\nu_2} + \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} - 1 \right) \cdot R \right], \quad \nu_2 - \text{угол}$$

наклона кривой усталости при симметричном цикле нагружения, ν_1 – угол наклона кривой усталости при отнулевом цикле нагружения; $a = 2 / [2 - (1 - \Psi) \cdot (1 + R)]$.

Формула (1) действительна для случаев описываемых неравенством $\sigma_{\max} > \sigma_R$. Для циклов соответствующих $\sigma_{\max} \leq \sigma_R$ было предложено использовать подход, основанный на кинетике усталостного повреждения и линейной зависимости предела выносливости от предела прочности. Суть его заключается в пропорциональном изменении предельных напряжений по мере накопления усталостного повреждения. Модификация исходной диаграммы предельных амплитуд выполняется с применением зависимости:

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}'} = \frac{\sigma_R}{\sigma_R'}, \quad (2)$$

где σ_{-1}' – значение сниженного предела выносливости при симметричном нагружении; σ_R – значение предела выносливости для цикла с коэффициентом асимметрии R ; σ_R' – значение сниженного предела выносливости для цикла с коэффициентом асимметрии R .

На основании предложенного подхода получено следующее выражение для приведения асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным для случаев $\sigma_{\max} \leq \sigma_R$:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{\max}}{a}. \quad (3)$$

Выделенные методом полных циклов асимметричные циклы напряжений и приведенные к эквивалентным по повреждению симметричным представляли собой нагрузочный спектр, соответствующий конкретному заезду. Повреждающее действие данного спектра, при регулярном его повторении, оценивалось с применением кинетической гипотезы суммирования усталостных повреждений, предложенной Е.К. Почтенным [11].

В рамках работ по ГНТП «Белавтотракторостроение» для Минского автомобильного завода была разработана компьютерная программа «Resurs», позволяющая выполнять расчеты с использованием всех упомянутых ранее методов и предоставлять результат расчета для соответствующих условий эксплуатации в километрах пробега. Все расчеты выполнялись с использованием данной компьютерной программы. При этом производилась корректировка всех процессов нагружения путем добавления статической составляющей от массы груза и автомобиля. Основные результаты прогнозирования усталостной долговечности представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, движение по ровному асфальтированному покрытию не вызывает усталостных повреждений даже при максимальной скорости движения. Движение по грунтовой дороге обладает практически в два раза большим повреждающим действием по отношению к разбитому асфальтированному покрытию при близких скоростных режимах.

На рис. 5 представлена зависимость долговечности картера от скорости движения автомобиля-лесовоза по разбитому асфальтированному покрытию. Она является наглядным свидетельством влияния скоростного режима на интенсивность накопления усталостных повреждений в конструкции в тяжелых дорожных условиях.

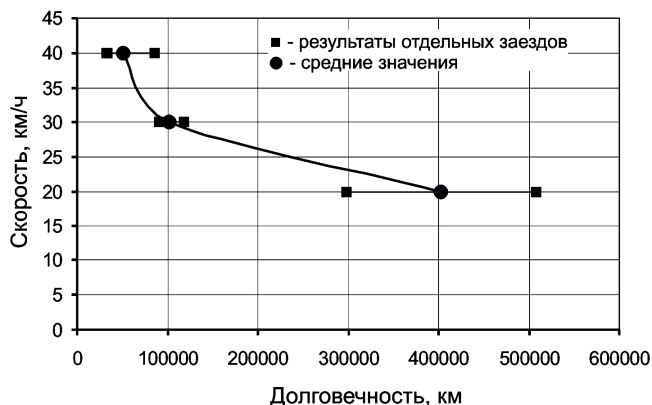


Рис. 5. Зависимость долговечности картера моста от скорости движения автомобиля

Движение груженого автомобиля-лесовоза с максимальными скоростями в тяжелых дорожных условиях является достаточно редким явлением, поэтому при прогнозировании долговечности элементов его конструкций необходимо учитывать относительную составляющую конкретного нагрузочного режима в общем рабочем цикле машины. Для этого был использован подход, изложенный в работе [8], согласно которому суммарная долговечность при различных типовых режимах эксплуатации машины может быть определена из выражения:

$$\frac{1}{L_{\Sigma}} = \sum_{j=1}^m \frac{\beta_j}{L_{cj}}, \quad (4)$$

где L_{Σ} – суммарная долговечность конструкции, j – текущий номер типового режима, m – число типовых режимов, β_j – доля j -ого типового нагрузочного режима в рабочем цик-

ле, L_{cj} – долговечность конструкции для j -ого типового нагрузочного режима.

На основании данных работы [9], можно принять следующие значения удельных составляющих каждого режима эксплуатации автомобиля-лесовоза:

- доля движения по ровному асфальтированному покрытию составляет 70%, т.е. $\beta_{ровн.а.}=0,7$;
- доля движения по разбитому асфальтированному покрытию составляет 20%, т.е. $\beta_{разб.а.}=0,2$;
- доля движения по грунтовой дороге составляет 10%, т.е. $\beta_{г.д.}=0,1$.

Кроме того, были введены следующие допущения: по грунтовой дороге автомобиль движется только в диапазоне скоростей 20-30 км/ч, по разбитому асфальтированному покрытию – со скоростью 30 км/ч, движение в снаряженном состоянии не оказывает повреждающего действия. Учитывая цикличность работы лесовоза, доля движения в груженом состоянии составляет 50%, $\beta^{gp}=0,5$. В результате получается упрощенная схема рабочего цикла автомобиля-лесовоза, представленная на рис. 6.

Согласно этой схеме движение в груженом состоянии по грунтовой дороге в интервале скоростей 20-30 км/ч составляет 5% или $\beta_{г.д.}^{gp} = 0,05$ и по разбитому асфальтированному

покрытию со скоростью 30 км/ч – 10% или $\beta_{разб.а.}^{gp} = 0,1$.

Эти удельные показатели представляют достаточно жесткий нагрузочный режим, который позволит получить результат, идущий в запас долговечности.

Усталостная долговечность картера на основании формулы (2) и результатов прогнозирования усталостной долговечности (таблица 4, данные по пробегам для уровня вероятности 90%) составит ≈ 350 тыс.км. При среднем годовом пробеге в 30 тыс. км срок эксплуатации новой конструкции составит более 10 лет. Кроме того, для картера данной конструкции были проведены стендовые испытания при циклическом регулярном нагружении с величиной максимальной нагрузки $P_{max}=1,9 \cdot P_{cm}$ и коэффициентом асимметрии цикла 0,06. В данном режиме картер отработал на испытательном стенде более 1 млн. циклов без существенных повреждений. Расчет с использованием компьютерной программы «Resurs» показал, что для данного режима нагружения усталостного повреждения не прогнозируется.

Заключение

Анализ данных по нагруженности картера переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза и результатов прогнозирования долговечности позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение скорости движения на 10 км/ч в диапазоне скоростей 50-70 км/ч, при движении по ровному асфальтированному покрытию, приводит к росту нагруженности конструкции в среднем на 5 - 15%. Данный режим эксплуатации для всего скоростного диапазона, с точки зрения усталости, не является повреждающим;
- увеличение скорости движения на 10 км/ч в диапазоне скоростей 20-40 км/ч, при движении по разбитому асфальтированному покрытию, приводит к росту нагруженности в среднем на 20 - 40%, что вызывает снижение усталостной долговечности от двух до четырех раз;
- повреждающее действие режима движения по грунтовой дороге в диапазоне скоростей 20-30 км/ч практически в два раза больше чем при движении по разбитому асфальтированному покрытию со скоростью 30 км/ч.

Усталостная долговечность картера, с учетом многорежимного характера нагружения и высокого уровня вероятности неразрушения, составляет 350 тыс. км, что эквивалентно практически 10 годам эксплуатации. Эта цифра говорит о достаточной надежности и долговечности новой конструкции.

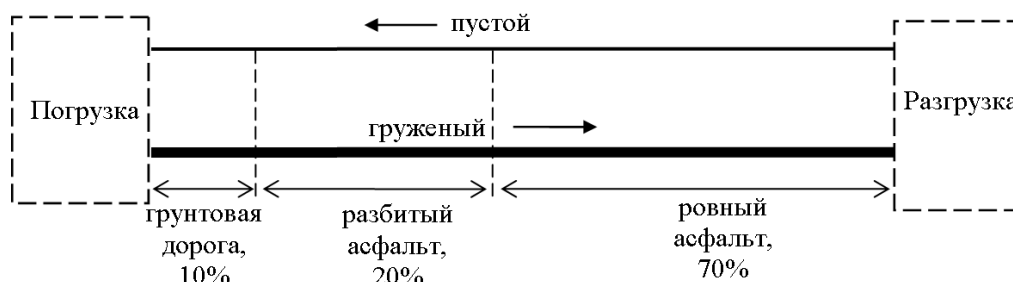


Рис. 6. Схема рабочего цикла автомобиля-лесовоза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Минюкович С.М., Шмелев А.В. Анализ результатов тензометрирования рамы автомобиля-самосвала при эксплуатации в карьере. Современные методы проектирования машин: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 2. В 7 томах. – Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин/ Под общ. Ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. с. 168-172.
2. Бернацкий А.К., Высоцкий М.С., Горбачевич М. И. и др. Нагруженность балок осей автомобилей. – Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1983. – 52 с.
3. Разработка методов испытания, прогнозирования и повышения усталостной долговечности ответственных деталей большегрузных автомобилей. Отчет о НИР/ИНДМАШ АН БССР; Рук., Е.К. Почтенный и А.А. Ракицкий. - № Г.Р. 80030724. Инв. №0285.0014992. – Минск, 1984. – 178 с.
4. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. – Минск, УП «Арти-Фекс», 2002. – 187 с.
5. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
6. Дмитриченко С.С., Борисов Ю.С., Русанов О.А. Накопленные повреждения и характеристики сопротивления усталости узлов и деталей мобильных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машин. 2003, №8. с 26-31.
7. Jono M. Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress-strain ranges. International Journal of Fatigue 27 (2005). p. 1006-1015.
8. Почтенный Е.К. Анализ и синтез усталости элементов конструкций // Доклады НАН Беларуси, 2002, №2. с. 105-107.
9. Жуков А.В. Теория лесных машин. Учебное пособие для студентов вузов. – Мн.: БГТУ, 2001. – 640 с.

УДК 629.114-587

*Дубовик Д.А., Николаев Ю.И., Брижанев В.М.***ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ ВНЕДОРОЖНЫХ МАШИН ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖКОЛЕСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА**

Введение. Проходимость является одним из основных эксплуатационных свойств внедорожных машин, непосредственно обеспечивающих их целевое назначение. Поэтому ведущие производители внедорожных машин для повышения эффективности своей продукции уделяют большое внимание улучшению как профильной, так и опорно-цепной проходимости.

Анализ научно-технической литературы показывает, что достижение высокой профильной проходимости обеспечивается величиной дорожного просвета, равной 0,45 м и более, углами переднего и заднего свеса свыше 30 град, высокими значениями продольного и поперечного радиусов проходимости, других геометрических параметров, характеризующих способность машины преодолевать различные препятствия.

С целью обеспечения высокой опорно-цепной проходимости на внедорожных машинах применяются широкопрофильные шины с регулируемым давлением воздуха, соответствующие типы подвесок колес, обеспечивается высокая удельная мощность машины для достижения высокой динамики движения. При этом опыт эксплуатации внедорожных машин свидетельствует о том, что проходимость определяется не столько максимальной величиной реализуемой их двигателем общей касательной силы тяги, сколько распределе-

нием этой силы между ведущими мостами и колесами.

Для рационального распределения общей касательной силы тяги между ведущими мостами и колесами в конструкции внедорожных машин используются дифференциалы, работа которых основана на блокировании привода ведущих колес. В задних ведущих мостах широко применяются самоблокирующиеся дифференциалы свободного хода, в качестве межосевых и межтележных дифференциалов используются дифференциалы с блокировкой, управляемой водителями [1].

Однако данные дифференциалы в случае блокирования привода при криволинейном движении колесных машин создают в плоскости дороги момент сопротивления повороту и вместе с тем ухудшают их поворачиваемость и управляемость.

Целью настоящей работы является разработка метода распределения крутящих моментов между ведущими колесами для повышения проходимости внедорожных машин при сохранении удовлетворительного уровня управляемости и его реализация в дифференциале повышенного трения управляемых мостов.

Ступенчатая характеристика блокирующих свойств. Характерной особенностью внедорожных машин является предъявление к их приводу ведущих колес противоречивых

Дубовик Дмитрий Александрович, к.т.н., зам. генерального директора по научной работе, директор НТЦ по автотракторной электронике и электромеханике Научно-инженерного республиканского унитарного предприятия "Белавтотракторостроение" Национальной академии наук Беларуси.

Николаев Юрий Иванович, главный конструктор Производственного республиканского унитарного предприятия "Минский завод колесных тягачей".

Брижанев Владимир Михайлович, начальник КБ мостов Производственное республиканское унитарное предприятие "Минский завод колесных тягачей".