Механика деформируемого твердого тела

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-2>
УДК 622.23.05

И.А. Паначев, И.В. Кузнецов

ПАНАЧЕВ ИВАН АНДРЕЕВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: pia.sm@yandex.ru
КУЗНЕЦОВ ИЛЬЯ ВИТАЛЬЕВИЧ – к.т.н., заведующий кафедрой, AuthorID: 803312,
SPIN-код: 5713-2001, ResercherID: J-4300-2016, ScopusID: 56988788100,
ORCID: 0000-0002-5747-4333, e-mail: kuznetcov-ilia@yandex.ru
Кафедра строительных конструкций, водоснабжения и водоотведения
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Весенняя ул., 28, Кемерово, Россия, 650000

Анализ ресурса несущих элементов задних мостов карьерных самосвалов в процессе их эксплуатации при различных значениях руководящего уклона трассы

Аннотация: Представлены результаты анализа напряженного состояния металлических конструкций задних мостов карьерных самосвалов БелАЗ в производственных условиях при различных значениях руководящего уклона. Описываются способы получения и обработки осциллограммы напряжений. Приведен расчет напряженного состояния заднего моста самосвала при циклических нагрузках с учетом реальной трещины на примере модели БелАЗ-75131. Установлены критерии и показатели долговечности несущих элементов задних мостов большегрузных машин БелАЗ-75131, БелАЗ-75306, БелАЗ-75600. Графически представлена взаимосвязь значений коэффициента остаточного ресурса и руководящего продольного уклона трассы. Приведены рекомендации по эксплуатации карьерного транспорта в условиях разрабатываемого месторождения с целью сохранения ресурса несущих металлоконструкций задних мостов.

Ключевые слова: металлические конструкции, трещины конструкций, напряжения, твердотельное моделирование, наработка до отказа, долговечность и надежность, продольный уклон.

Введение

Временные, трудовые и экономические затраты предприятий открытой добычи связаны в большей степени с поддержанием готовности к эффективной эксплуатации подвижного состава. Задачи сохранения ресурса и минимизации внеплановых ремонтных работ являются наиболее актуальными как для эксплуатирующих предприятий, так и для проектных организаций [4]. На надежность и долговечность элементов и систем несущих металлических конструкций карьерных самосвалов в большей степени влияют горно-технические и горно-геологические условия работы: масса перевозимой взорванной горной породы, скорость движения, руководящий продольный уклон трассы, глубина разработки, состояние дорог и т.д. Важнейшим ресурсозатратным параметром из названных факторов является уклон трассы на подъем, когда резко возрастают нагрузки на элементы металлоконструкций автосамосвалов и, соответственно, прогрессирует рост трещин [7].

В данной работе мы представляем анализ сокращения ресурса несущих элементов задних мостов карьерных самосвалов в процессе эксплуатации при различных значениях руко-

дящего уклона трассы. На основе выполненных нами исследований напряженно-деформированного состояния элементов металлических конструкций большегрузных автомобилей нами будет предпринята попытка установить изменение показателей долговечности для моделей БелАЗ-75131, БелАЗ-75306 и БелАЗ-75600.

Определение и анализ напряжений в металлоконструкциях задних мостов самосвалов в процессе эксплуатации

Влияние условий эксплуатации на изменение рабочих напряжений в металлических конструкциях автосамосвалов в простейших случаях удается установить и описать их аналитическими зависимостями. Однако зачастую закон изменения напряжений устанавливается только посредством экспериментальных исследований при испытании карьерных самосвалов в различных геологических и технических условиях с бесперебойной фиксацией деформаций (напряжений) на ленту осциллографа [1]. С целью оценки деформированного состояния несущих металлоконструкций большегрузных самосвалов БелАЗ-75131, БелАЗ-75306 и БелАЗ-75600 в рабочих условиях сотрудниками КузГТУ проведены исследования в период с 2015 по 2017 г. на разрезах Кузбасса с использованием экспериментально-вычислительного центра, в состав которого входят ноутбук, восьмиканальная тензостанция А-17-18, фольговые тензорезисторы 2ФКРВ-3×400, экранированный кабель НВПЭ, предварительный усилитель ZET410, аналого-цифровой преобразователь Е14-140D, усилитель напряжения для тензомоста LP-04, аккумуляторная батарея, балансирующая коробка, электромагнитный экран [2]. Для приварки металлической подложки тензорезисторов использовался сварочный аппарат для точечной сварки. Запись измеренных сигналов осуществлялась с помощью программного обеспечения PowerGraph v. 3.3.6 Professional и Zetlab.

Тензорезисторы, показания которых транслировались в процессе эксплуатации на тензостанцию, наклеивались в опасных зонах металлоконструкций большегрузных самосвалов (рис. 1).

Рис. 1. Области крепления тензорезисторов (здесь и далее иллюстрации авторов).

Рисунок 2 иллюстрирует участки с максимальными значениями напряжений, которые характеризуют движение груженой машины на продольном уклоне с подъемом трассы с поворотом. При прохождении участка трассы на подъем с поворотом груженого автосамосвала в металлоконструкциях балки заднего моста возникают более высокие рабочие напряжения, чем при движении по прямым забойным и технологическим дорогам. Воздействия неровностей профиля трассы отображаются на диаграмме всплесками напряжений.

Полученные осциллограммы обрабатывались посредством разметки точек экстремумов. Каждая последующая полуразность между экстремальными напряжениями принималась за амплитуду очередного цикла нагружения [3].

Рис. 2. Осциллограмма напряжений карьерного самосвала БелАЗ-75131.

Отфильтрованная таким образом осциллограмма разбивалась на блоки, каждый из которых соответствовал циклу эксплуатации карьерного самосвала – время, которое самосвал затратил на погрузку, перевозку горной массы до места разгрузки, разгрузку, движение до места погрузки, ожидание погрузки. Также учитывалось, что при ожидании разгрузки-погрузки и в момент разгрузки возникающие напряжения в конструкциях заднего моста самосвала несущественно влияют на его ресурс.

Расчет показателей долговечности несущих металлоконструкций при циклических нагрузках (на примере самосвала БелАЗ-75131)

При движении большегрузной машины по забойным и технологическим дорогам в металлических конструкциях её заднего моста под действием изменяющихся нагрузок возникают напряжения, величины которых зачастую превышают предел выносливости, что является следствием образования трещин, прогрессирующих со временем и приводящих к полному разрушению элементов и систем.

Оценка интенсивности возникающих деформаций и напряжений в конструкциях заднего моста за один рейс эксплуатации производилась с использованием графика нагружения его элементов [5]. Часть данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

Часть данных графика нагружения заднего моста самосвала БелАЗ-75131

Сила тяжести на левое колесо, кН	Сила тяжести на правое колесо, кН	Крутящий момент двигателя, кНм	Тяговая сила, кН
686	536	3,6	44,8
697	525	3,6	44,8
655	568	3,6	44,8
666	556	3,6	44,8
592	630	3,6	44,8

Путем расчета объемной модели выполнялась оценка напряженно-деформированного состояния заднего моста самосвала БелАЗ-75131 при эксплуатации (рис. 3).

Рис. 3. Графическое отображение напряженного состояния металлоконструкций самосвала БелАЗ-75131 (расчет при циклических нагрузках), зоны возникновения максимальных напряжений, образующиеся:

А – в местах соединения картера и корпуса электромотор-колеса,

Б – в местах крепления цилиндров подвески.

По результатам расчета установлено, что значения деформаций не превышают 2 мм, а напряжения принимают максимальные значения в 240 МПа. Учитывая, что материал корпуса выполнен из стали 30Л ($\sigma_{0,2} = 245$ МПа), а приваренных деталей – из стали 20 ($\sigma_{0,2} = 200$ МПа), констатируем, что возникающие во время работы деформации и напряжения влияют на зарождение и развитие трещиноподобных дефектов.

В процессе мониторинга и диагностики разрабатываемого месторождения было проанализировано образование трещины в зоне стойки для крепления гидроцилиндра. Для расчета параметров надежности и долговечности заднего моста использовалась модель трещины, имеющая прямоугольную форму размером 200x20 мм [7]. По результатам расчета определялись такие показатели, как коэффициент запаса прочности по амплитудам напряжений, количество циклов нагружения до отказа, эквивалентные амплитуды напряжений (рис. 4).

Рис. 4. Графическое распределение показателей долговечности:

А – коэффициента запаса прочности по амплитудам напряжений,

Б – эквивалентных амплитуд напряжений.

Расчет показателей долговечности производился посредством программного комплекса ANSYS. Коэффициент запаса прочности по долговечности определялся по формуле

$$n_{SF}^N = \frac{N_\sigma}{N_i}, \quad (1)$$

где N_i – текущая долговечность, цикл; N_σ – усталостная долговечность, принятая равной 10^9 циклов.

Коэффициенты запаса прочности по амплитудам напряжений (n_{SF}^σ) и амплитудам полной локальной деформации (n_{SF}^ε) определялись как

$$\begin{aligned} n_{SF}^\sigma &= \frac{\sigma_a}{\sigma_a^{\text{ЭКВ}}}; \\ n_{SF}^\varepsilon &= \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_a^{\text{ЭКВ}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_a – амплитуда напряжений, МПа; $\sigma_a^{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная амплитуда напряжений, полученная после сведения к эквивалентному по повреждаемости симметричному циклу приведенных характеристик одноосного цикла нагружения, МПа; ε_a – амплитуда деформаций; $\varepsilon_a^{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная амплитуда деформаций.

Результаты расчета для карьерных самосвалов с учетом заданной трещины представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели долговечности металлоконструкций задних мостов самосвалов

Самосвал	Вершины трещины	Эквивалентные амплитуды напряжений, МПа	Текущая долговечность, циклы	Коэффициент запаса прочности n_{SF}^N	Коэффициент запаса прочности n_{SF}^{σ}	Коэффициент запаса прочности n_{SF}^{ε}
75131	Нижняя	169,06	78764	12706,48	2,25	1,96
	Верхняя	248,57	32170	31152,65	2,11	2,04
75306	Нижняя	198,61	82437	12130,48	2,31	2,01
	Верхняя	262,09	44976	22234,08	2,20	2,38
75600	Нижняя	205,74	80588	12408,79	2,44	2,15
	Верхняя	259,22	37422	26722,25	2,08	2,23

Таблица 2 иллюстрирует, что среднее значение коэффициента запаса прочности по амплитудам напряжений и деформаций составляет 2,2. Количество циклов до отказа конструкции, соответствующее величинам текущей долговечности в вершинах трещин, доказывает, что эксплуатация металлических элементов карьерных самосвалов осуществляется на границе между малоцикловой и многоцикловой усталостями.

Анализ полученных результатов

Для ограниченных условий эффективной работы карьерного автотранспорта заводом-изготовителем определяется наработка на отказ (T) большегрузных самосвалов: например, для БелАЗ-75131 она составляет до капремонта 30 тысяч моточасов (в экстремальных условиях эксплуатации), а при дальнейшей работе после проведения восстановительных работ – до 60 тысяч моточасов [6]. На сегодняшний день карьерный автотранспорт зачастую эксплуатируется в экстремальных условиях, не соответствующих рекомендованным заводом-изготовителем. Следовательно, происходит сокращение гарантированного ресурса металлических конструкций.

За критерий долговечности принимается коэффициент остаточного ресурса, который представляет собой отношение расчетной наработки до отказа эксплуатируемого самосвала ($T_{\text{рас}}$) к гарантированной заводом-изготовителем наработки до отказа ($T_{\text{гар}}$):

$$K_p = \frac{T_{\text{рас}}}{T_{\text{гар}}}. \quad (3)$$

Нарботка на отказ определялась по формуле

$$T_{\text{рас}} = \frac{N}{N_p} \cdot 12. \quad (4)$$

Количество циклов нагружения за рейс (N_p) определялось экспериментально посредством систем навигации, оно соответствует затраченному времени на транспортирование. Количество циклов нагружения до отказа (N) определялось зависимостью, которая с наибольшей точностью соответствует всем трем моделям исследуемых самосвалов:

$$N = 1 \cdot 10^{14} M_{\sigma a}^{-3,52}, \quad (5)$$

где $M_{\sigma a}$ – математическое ожидание амплитуды напряжений, МПа.

Взаимосвязь математического ожидания амплитуды напряжений от продольного уклона карьерной дороги была получена авторами ранее, а результаты исследований опубликованы в рецензируемых журналах. Расчет основных показателей нагружения конструкций самосвалов при уклонах от 80 до 120‰ представлен в табл. 3.

Таблица 3

Расчет основных показателей нагружения конструкций самосвалов

Самосвал	Уклон, ‰	Математическое ожидание амплитуды напряжений, МПа	Количество циклов нагружения до отказа	Наработка на отказ, моточас	Коэффициент остаточного ресурса
75131	80	62,2	48524464,92	85130,64	1,42
	90	75,03	25069518,47	43599,16	0,73
	100	91,22	12604080,43	21731,17	0,36
	110	111,3	6254594,643	10691,61	0,18
	120	135,9	3097650,102	5250,25	0,09
75306	80	48,32	118010705,4	207036,33	3,45
	90	55,64	71818261,16	124901,32	2,08
	100	65,09	41353796,99	71299,65	1,19
	110	77,08	22805470,84	38983,71	0,65
	120	92,07	12197385,35	20673,53	0,34
75600	80	66,18	38994777,84	68411,89	1,14
	90	82,89	17651891,12	30698,94	0,51
	100	105,18	7633959,209	13161,99	0,22
	110	134,27	3232455,824	5525,57	0,09
	120	171,5	1365706,9	2314,76	0,04

По результатам расчета были построены графики зависимостей коэффициента остаточного ресурса от руководящего продольного уклона трассы для большегрузных самосвалов БелАЗ-75131, БелАЗ-75306, БелАЗ-75600 (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость коэффициента остаточного ресурса от руководящего продольного уклона трассы для самосвалов различной грузоподъемности.

Рисунок 5 иллюстрирует, что закон распределения коэффициента остаточного ресурса (K_p) от руководящего продольного уклона (i) для самосвалов различной грузоподъемности соответствует полиномиальной зависимости, что подтверждается значениями коэффициентов аппроксимации:

$$\begin{aligned} \text{для БелАЗ 75131} &\rightarrow K_p = 0,0026i^2 - 0,5452i + 28,672 (R^2 = 0,996); \\ \text{для БелАЗ 75306} &\rightarrow K_p = 0,001i^2 - 0,3122i + 22,985 (R^2 = 0,9874); \\ \text{для БелАЗ 75600} &\rightarrow K_p = 0,0019i^2 - 0,4274i + 23,822 (R^2 = 0,986). \end{aligned} \quad (6)$$

С целью эффективной эксплуатации карьерного автотранспорта, а также сохранения ресурса несущих металлоконструкций минимальные допустимые значения коэффициента остаточного ресурса должны варьироваться от 1 до 3. Рисунок 5 позволяет сделать вывод, что максимально допустимые продольные уклоны трассы по критерию прочности принимают значения: для работы самосвалов БелАЗ-75131 и БелАЗ-75600 – 65–85%, а для работы БелАЗ-75306 – 82–102%. Деформирование металлических конструкций вызывает накопление различных дефектов, что приводит к сокращению их ресурса. Для предотвращения поломок и выхода из строя элементов и систем карьерного автотранспорта рекомендуется эксплуатировать его на уклонах, не превышающих данные значения, т.е. придерживаться тех значений руководящего уклона, которые рекомендуются заводом-изготовителем самосвалов. Если же условия работы самосвалов ведутся с руководящим уклоном больше, чем рекомендовано заводом-изготовителем, следует пересчитать остаточный ресурс и довести его значение до службы механика карьера.

Заключение

Нагрузки на металлические конструкции горных машин подвижного состава в определенных случаях достигают критических значений при прохождении участков трассы на подъем. Значения возникающих при этом напряжений существенно зависят от величин руководящего уклона технологической дороги. В связи с этим предупреждение недопустимых деформаций и трещин в металлоконструкциях задних мостов самосвалов основывается на рациональной эксплуатации карьерного автопарка на больших глубинах разрабатываемого месторождения.

По критериям прочности, долговечности и ресурсосбережения из всего разнообразия автомобилей линейного ряда ЗАО «БелАЗ» наиболее надежной машиной является БелАЗ-75306 с грузоподъемностью 220 т, эксплуатация которого допускается при значениях руководящего уклона до 110%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов П.В. Влияние эксплуатационных факторов на параметры долговечности металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 5. С. 43–47.
2. Зырянов И.В., Тарасов П.И., Фефелов Е.В. Дифференциация условий эксплуатации карьерных автосамосвалов // Горная промышленность. 2016. № 3(127). С. 51–53.
3. Испеньков С.А., Ракицкий А.А. Моделирование динамической нагруженности рам карьерных самосвалов // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2011. № 10. С. 174–180.
4. Лель Ю.И., Арефьев С.А., Дунаев С.А., Глебов И.А. Развитие идей чл.-корр. РАН В.Л. Яковлева по учету влияния горно-технических условий эксплуатации на показатели карьерного автотранспорта // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 136–144.
5. Паначев И.А., Широколов Г.В., Кузнецов И.В. Исследование напряженно-деформированного состояния балки заднего моста автосамосвала БелАЗ-75131 и расчет количества циклов нагружения до отказа // Вестник Кузбас. гос. ун-та. 2015. № 1. С. 29–33.
6. Фасхиев Х.А. Разработка норм прочности передних мостов грузовых автомобилей // Вестник Уфимского гос. авиационного тех. ун-та. 2014. № 3. С. 106–111.
7. Manakov A.L., Igumnov A.A., Kolarge S.A. Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines. J. of Mining Science. July 2013(49);4:630–636.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-2>

Panachev I., Kuznetsov I.

IVAN PANACHEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: pia.sm@yandex.ru
 ILYA KUZNETSOV, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department,
 ResercherID: J-4300-2016, ScopusID: 56988788100, ORCID: 0000-0002-5747-4333,
 e-mail: kuznetcov-ilia@yandex.ru
 Department of Building Structures, Water Supply and Sanitation
Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev
 28 Vesenniyaya St., Kemerovo, Russia, 650000

Life cycle analysis of the bearing elements of the rear axles of dump trucks in operation at different values of the ruling gradient of the road

Abstract: The paper presents the results of the analysis of the stress state of metal structures of the rear axles of BelAZ dump trucks under production conditions at different values of the ruling gradient. The methods of obtaining and processing the oscillograms are described. The calculation of the stress state of the rear axle of a dump truck under cyclic loads taking into account the real crack is given on the example of the BelAZ-75131 model. Criteria and indicators of durability of bearing elements of back bridges of heavy-load trucks BelAZ-75131, BelAZ-75306, BelAZ-75600 are established. Graphical displays demonstrating the relationship between the values of the remaining service life coefficient of the steering and the longitudinal gradient of the route are presented. Recommendations for the operation of quarry transport under conditions of the developed field in order to preserve the resource of the bearing metal structures of the back axles are given.

Keywords: metal structures, cracks, stresses, solid modeling, operating time to failure, durability and reliability, longitudinal slope.

REFERENCES

1. Artamonov P.V. Influence of operational factors on the parameters of durability of metal structures of heavy-duty dump trucks. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2010;5:43–47.
2. Zyryanov I.V., Tarasov P.I., Fefelov E.V. Differentiation of operating conditions of dump trucks. *Mining*. 2016;3:51–53.
3. Ispenkov S.A., Rakitskiy A.A. Modeling of dynamic loading of frames of dump trucks. *Bulletin of OSU*. 2011;10:174–180.
4. Lel Y.I., Aref'ev S.A., Dunaev S.A., Glebov I.A. Development of ideas corresponding member RAS V.L. Yakovlev on account of the impact of mining conditions on the performance of mining vehicles. *Problems of Subsoil Use*. 2014;3:136–144.
5. Panachev I.A., Shirokolobov G.V., Kuznetsov I.V. Investigation of stress-strain state of the beam rear axle of the dump truck BelAZ 75131 and the calculation of the number of loading cycles to failure. *Bulletin of the Kuzbass State Univ*. 2015;1:29–33.
6. Fashiev H.A. Development of strength standards of front axles of trucks. *Bulletin of USATU*. 2014;3:106–111.
7. Manakov A.L., Igumnov A.A., Kolarge S.A. Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines. *J. of Mining Science*. July 2013(49);4:630–636.