

МЕТОД КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЪЕМНИКОВ ПАНТОГРАФНОГО ТИПА

В.С. Калинин, Ю.А. Власов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск

Представлен метод отказоустойчивого неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния несущих элементов подъемно-транспортных машин рассмотренный на примере опытного образца подъемника пантографного типа. Выполнен анализ основных требований, предъявляемых к несущим элементам подъемно-транспортных машин. Разработана методика экспериментальных исследований включающая тензометрический и тепловой методы неразрушающего контроля. Показан натурный эксперимент опытного образца подъемника пантографного типа.

Ключевые слова: пантографный подъемник, напряженно-деформированное состояние, отказоустойчивый контроль, механизм деформационного теплообразования.

ВВЕДЕНИЕ

Существует класс подъемно-транспортных машин (ПТМ), разработка, испытания и производство которых имеют определенные особенности. К таким машинам специального назначения можно отнести мобильный комплекс связи на базе автомобиля КАМАЗ повышенной проходимости с установленным подъемником пантографного типа. Высота подъема мачты 32 м, с полезным грузом до 1 т и возможностью работы в суровых климатических условиях Крайнего Севера: в частности, при температуре окружающей среды $\pm 50^{\circ}\text{C}$ и при порывах ветра до 30 м/с. Особенностью работы данной машины является то, что каждый цикл подъем/опускание предполагает постоянное и непрерывное истощение ресурса металлоконструкции подъемника и тяговых канатов механизма подъема. Несмотря на применение высокопрочной стали в конструкции подъемника необходимость снижения массогабаритных показателей вынуждает обеспечивать функционирование подъемника в области слабых пластических деформаций.

Для исследований эксплуатационной нагруженности машин и конструкций разработаны эффективные методы натурной тензометрии, обеспечивающие проведение исследований статических, квазистатических и динамических деформаций (напряжений) при высоких и низких температурах [1]. Экспериментальные тензометрические методы применяются при исследовании горных машин [2], подвижных составов [3-4], а также при проведении приёмо-сдаточных и периодических испытаний грузоподъемных кранов [5] и мобильных подъемников [6].

Метод теплового неразрушающего контроля на основе механизма деформационного теплообразования на сегодняшний день имеет значительные перспективы внедрения при испытании металлоконструкций машин [7-10].

Основным требованием, предъявляемым к металлоконструкциям ПТМ, является сохранение несущей способности, при этом прогибы и деформации в общем случае не нормируются, а, следовательно, в целях экономии при проектировании можно использовать все ресурсы пластической работы материала. По сути, конструкция должна обладать свойством живучести при воздействии на нее кратковременных динамических нагрузок. Применение методов теории живучести технических систем и статических и динамических оценок функционирования технических объектов позволяет точнее определить остаточный ресурс металлоконструкций ПТМ, после воздействий нормативных и сверхнормативных динамических нагрузок [11].

Цель данной работы заключается в разработке метода неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния ПТМ и в частности подъемников пантографного типа при проведении приёмо-сдаточных и периодических испытаний.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА

Метод контроля напряженно-деформированного состояния ПТМ и в частности подъемников пантографного типа поясняется схемой (рис. 1).

Опытный образец подъемника пантографного типа (рис. 1, поз. 1) подвергается статическому или динамическому испытанию в нормативных и сверхнормативных режимах работы. Измеряемые величины деформаций (напряжений) для первичных

преобразователей (рис. 1, поз. 2) предварительно рассчитываются на основе физико-математического моделирования с заданием геометрических размеров конечного элемента, с учётом геометрических размеров первичных преобразователей и рабочих диапазонов контролируемых величин. Устанавливаются первичные преобразователи по результатам математического моделирования в точки проверки выходных рабочих параметров испытываемой ПТМ или подъемника пантографного типа.

Для обеспечения достоверности регистрируемой информации регистрируются одновременно показания всех датчиков рабочих параметров с частотой запуска на регистрацию $f_{\text{рег}} = K_f f_m$, где K_f – коэффициент кратности частоты запуска $K_f \geq 2$, f_m – максимальная частота диагностики колебаний в конструкции машины.

Преобразование регистрируемых сигналов из аналоговой в цифровую форму осуществляется в бортовом регистраторе (рис. 1, поз. 3) (с возможностью подключения внешнего компьютера (рис. 1, поз. 9)) с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с диапазоном не менее 16 двоичных разрядов и частотой запуска 7 кГц, например, с помощью измерительно-вычислительного комплекса МИС-400, который перед проведением испытания конфигурируется по числу и типу применяемых датчиков. Настраиваются измерительные каналы по амплитуде измеряемых сигналов и частоте запуска на измерение и далее рассчитывается и обеспечивается необходимый объем памяти регистратора (рис. 1, поз. 3).

Для обеспечения защиты от потери данных результатов испытаний зарегистрированную информацию в процессе испытаний дистанционно передается по радиоканалу или с использованием сотовой сети (рис. 1, поз. 4) на терминал со встроенным компьютером и подключаемым внешним компьютером (рис. 1, поз. 9), расположенный вне испытываемой машины. Принятые терминалом сигналы дополнительно записываются для хранения в энергонезависимую память с возможностью считывания в случае необходимости (рис. 1, поз. 5). Кроме того, данные испытаний дополнительно передаются на специальный сайт с использованием глобальной сети интернет и организуется возможность удаленного доступа к ним.

Регистрируются измеряемые величины металлоконструкций испытываемой машины: величины сил приложенных к конструкции машины с помощью датчиков силы, приложение распределенной нагрузки к опорным точкам конструкции машины с помощью датчиков опорных реакций, напряжения и деформации элементов конструкции машины с помощью тензорезисторов. Датчики контактные или бесконтактные линейных перемещений устанавливаются в точках контроля

прогиба металлоконструкций испытываемой машины относительно опорной платформы или грунта. Микромеханические инерциальные преобразователи устанавливаются на опорной платформе (шасси) испытываемой машины, на подвижных элементах металлоконструкций. Регистрируются механические колебания и ускорения металлоконструкций пьезоэлектрическими акселерометрами и микромеханическими инерциальными преобразователями. Регистрируются прогибы и изменение положения элементов конструкции в процессе движения машины с помощью датчиков линейных перемещений и микромеханических инерциальных преобразователей.

Регистрируются измеряемые величины приводных агрегатов испытываемой машины: величины давления гидро и пневмосистем с помощью датчиков давления, параметры приводных агрегатов с помощью датчиков активной мощности, датчиков токов, датчиков напряжений, датчиков частоты питающей сети, датчиков крутящих моментов, датчиков частот вращения и датчиков температуры.

Датчики больших деформаций устанавливаются на тросы.

Регистрируются параметры окружающей среды (рис. 1, поз. 6) при проведении испытаний машины, используются приборы: анемометр, термометр, гигрометр, барометр которые устанавливаются на испытываемой машине.

Напряженно-деформированное состояние металлоконструкций дополнительно дистанционно регистрируется тепловизором (рис. 1, поз. 7). Геометрические размеры несущих элементов, и их изменения во времени, испытываемой машины дополнительно дистанционно регистрируются цифровыми фотоаппаратами и видеокамерой с повышенным разрешением (рис. 1, поз. 8). При этом напряженно-деформированное состояние металлоконструкции одновременно регистрируется методом тензометрии в отдельных точках элементов конструкции, методом фототензометрии по всем элементам конструкции или их части и термографическим методом по всем элементам конструкции машины. Далее данные испытаний полученные прямыми и косвенными методами сравниваются, сопоставляются и при необходимости дополняются, чем обеспечивается отказоустойчивость и достоверность измерений при сверхнормативных испытаниях машин на живучесть.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования проведенные в павильоне ООО «Юргинский машзавод» (рис. 2, 3) и обработка результатов испытаний опытного образца подъемника пантографного типа, позволили получить новые статистические данные применяемых методов неразрушающего контроля. Многоканальная

тензометрическая система [12] достаточно точно позволила оценить напряженно-деформированное состояние в отдельных точках конструкции на предмет соответствия проектным, расчетным нагрузкам [13]. Метод теплового неразрушающего контроля на основе механизма деформационного теплообразования синхронно использован при испытаниях (рис. 4-5) [14].



а) начало подъема



б) в процессе подъема

Рис. 2. Опытный образец подъемника пантографного типа, начало подъема

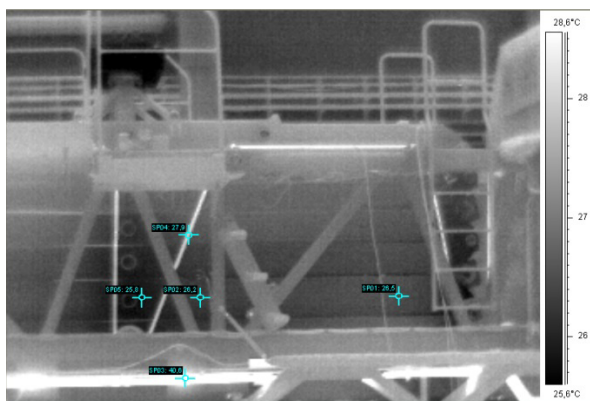


Рис. 3. Термограмма испытаний подъемника, начало подъема

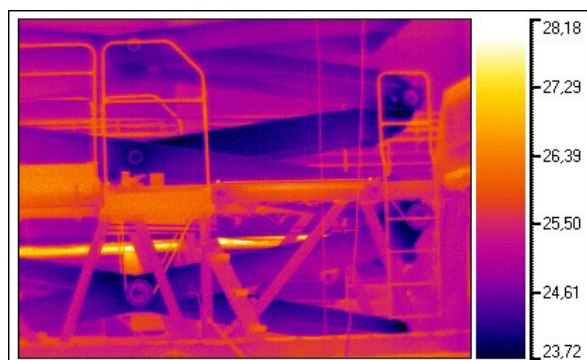


Рис. 4. Термограмма испытаний подъемника, в процессе подъема

Цена деления или единица младшего разряда для каждой измерительной системы определяется по формуле (1):

$$1mp_i = \frac{\varepsilon}{\Delta C}, \quad (1)$$

где ε – относительное значение деформации в конструкции; ΔC – показания системы при определении единицы младшего разряда.

Единицу младшего разряда теплового неразрушающего метода контроля на основе механизма деформационного теплообразования получили на основе сопоставления с данными тензометрии. Изменение деформации преобразуется в выделение тепла в диапазоне температурного поля, заданного пределами тепловизионного измерительного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе показано, что измерение деформаций и напряжений обеспечивается применением тензометрического метода, который обладает достаточной точностью измерений, но получаемая испытательная информация ограничена областями установки тензодатчиков. Разработан метод отказоустойчивого контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций ПТМ, который обеспечивается применением дублирующего, косвенного, дистанционного метода измерения механических напряжений и деформаций средствами инфракрасной термографии. Панорамные исследования ответственных конструкций позволяют проводить экспресс контроль в процессе эксплуатации машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин [Текст] / Н.А. Махутов [и др.]; отв. ред. Н.А. Махутов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. – 576 с.
2. Докунин, А.В. Статистическая динамика горных машин [Текст] / А.В. Докунин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
3. Бехер, С.А. Методы контроля динамически нагруженных элементов подвижного состава при ремонте и в эксплуатации на основе комплексного использования тензометрии и акустической эмиссии [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.11.13: защищена

03.10.2017: утв. 03.11.2017 / Бехер Сергей Алексеевич. – Новосибирск, 2017. – 321 с. – Библиогр.: с. 284–316.

4. Степанова, Л. Н. Быстродействующая тензометрическая система для диагностики ходовых частей грузовых вагонов [Текст] / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. С. Кочетков // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2010. – № 2. – С. 38-49.

5. ГОСТ 32579.1–2013 Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Часть 1. Общие положения [Текст]. – Введ. 2015-06-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 34 с.

6. ГОСТ 34443–2018 Мобильные подъемники с рабочими платформами. Расчеты конструкции, требования безопасности, методы испытаний [Текст]. – Введ. 2019-07-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 86 с.

7. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

8. Вавилов В.П. / Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) [Текст] // Дефектоскопия. – 2017. – № 10. – С. 34-57.

9. Мойсейчик, Е.А. Исследование и разработка метода теплового неразрушающего контроля стальных конструкций на основе механизма деформационного теплообразования [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.11.13: защищена 18.08.2019 / Мойсейчик Евгений Алексеевич. – М., 2019. – 277 с. – Библиогр.: с. 215–262.

10. Moiseychik, E. A., and V. P. Vavilov, “Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects,” *International J. of Damage Mechanics*, vol. 27, no. 6, pp. 950–960. June 2018.

11. Makhutov, N. A., Gadenin, M. M., Lepikhin, A. M., and Y. I. Shokin, “Justifying calculations of the security of promising machines and man-machine systems on the risk criteria of accidents and disasters,” *J. of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 47, no. 5, pp. 442–450. September 2018.

12. Пат. RU 101811 U1 Российская Федерация, МПК (2010) G 01 В 7/16. Многоканальная тензометрическая система для статических или динамических испытаний металлоконструкций строительных машин [Текст] / Ананин В.Г., Однокопылов Г.И., Калиниченко В.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский госуд. архит.-строит. университет. Заявка: 2010140385/28; заявл. 01.10.2010; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 14 с.: ил.

13. Калиниченко, В.С. Результаты экспериментальных исследований и анализ напряженного состояния металлоконструкции подъемника пантографного типа [Текст] / В.С. Калиниченко, В.Г. Ананин // Интерстроймех-2012: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, октябрь 2012. – С. 3-6.

14. Калиниченко, В.С. Экспериментальные исследования мобильного подъемника пантографного типа тепловизионным методом [Текст] / В.С. Калиниченко // В сборнике: Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»; Под редакцией Н. И. Черкасовой, декабрь 2013. – С. 263-267.

Калиниченко Владимир Сергеевич – старший преподаватель кафедры строительных и дорожных машин, заместитель декана механико-технологического факультета, ФГБОУ ВО ТГАСУ, тел. (3822)653468, e-mail: kvs-2010@mail.ru.

Власов Юрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и электротехники, декан механико-технологического факультета, ФГБОУ ВО ТГАСУ, тел. (3822)653468, e-mail: 3

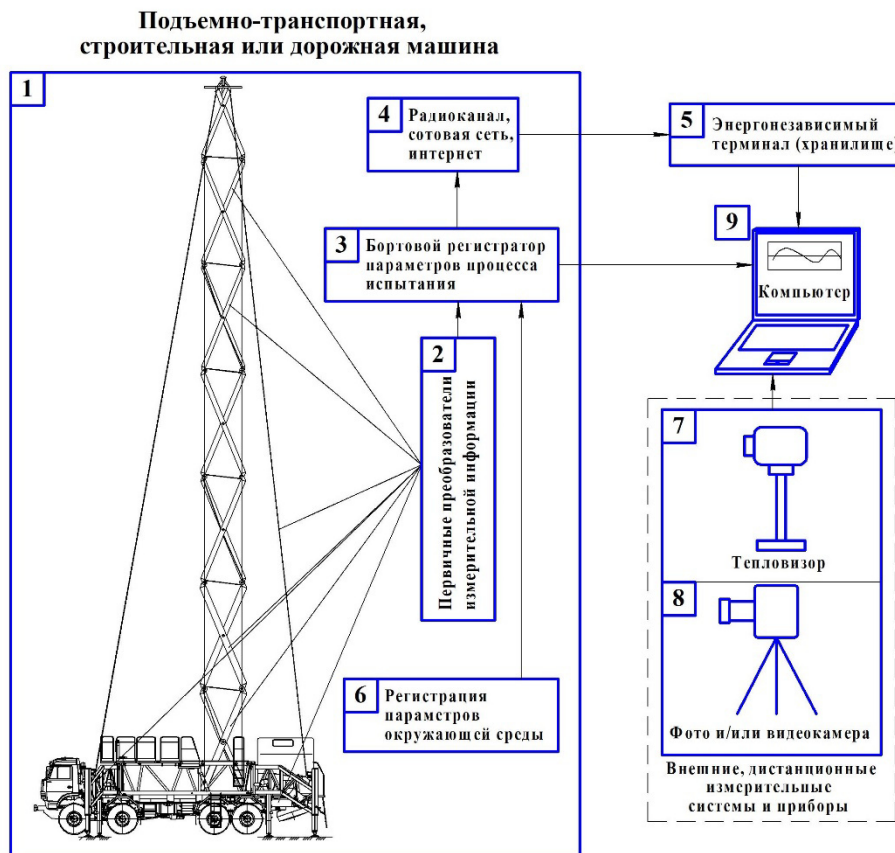


Рис. 1. Схема обеспечения метода контроля напряженно-деформированного состояния ПТМ и в частности подъемников пантографного типа

METHOD FOR CONTROL OF STRESS-DEFORMED STATE OF CARRYING ELEMENTS OF PANTOGRAPH-TYPE LIFTS

V.S. Kalinichenko, Yu.A. Vlasov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk

Abstract – A method of fail-safe non-destructive testing of the stress-strain state of load-carrying elements of hoisting-and-transport machines is presented, which is considered on the example of a prototype of a pantograph-type hoist. The analysis of the basic requirements for the load-bearing elements of hoisting-and-transport machines is carried out. A technique for experimental research has been developed, including strain gauge and thermal methods of non-destructive testing. Shown is a full-scale experiment of a prototype of a pantograph-type elevator.

Index terms: pantograph lift, stress-strain state, fail-safe control, deformation heat generation mechanism.

REFERENCES

1. Makhutov, N.A., et al., Strength, resource, survivability and safety of machines, 2nd ed., Stereotype. Moscow, Russia: Book House "LIBROKOM", 2019.
2. Dokunin, A. V., Yu. D. Krasnikov and Z. Ya. Khurgin, Statistical dynamics of mining machines, Moscow, Russia: Mechanical Engineering, 1978.
3. Becher, S.A., "Methods for monitoring dynamically loaded rolling stock elements during repair and operation based on the integrated use of tensometry and acoustic emission," dis. ... Dr. tech. sciences: 05.11.13. Novosibirsk, Russia, 2017.
4. Stepanova, L. N., S. A. Bekher and A. S. Kochetkov, "Fast-acting strain-gauge system for diagnostics of the running gears of freight cars," *J. Wagons and wagon economy*, no. 2, pp. 38-49, June, 2010.
5. GOST 32579.1–2013, "Cranes. Design principles for loads and load combinations. Part 1. General," 2015-06-01. Moscow, Russia: Standartinform, 2015.
6. GOST 34443–2018, "Mobile elevating work platforms. Design, calculations, safety requirements and test methods (MOD)," 2019-07-01. Moscow, Russia: Standartinform, 2018.
7. Vavilov, V. P., Infrared thermography and thermal control, Moscow, Russia: ID Spektr, 2009.
8. Vavilov, V. P., "Thermal non-destructive testing of materials and products (review)" *J. Defectoscopy*, no. 10, pp. 34-57, Oct. 2017.
9. Moiseichik, E.A., "Research and development of a method for thermal non-destructive testing of steel structures based on the mechanism of deformation heat generation," dis. ... Dr. tech. sciences: 05.11.13: Novosibirsk, Russia, 2019.
10. Moiseychik, E. A., and V. P. Vavilov, "Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects," *International J. of Damage Mechanics*, vol. 27, no. 6, pp. 950–960. June, 2018.
11. Makhutov, N. A., Gadenin, M. M., Lepikhin, A. M., and Y. I. Shokin, "Justifying calculations of the security of promising machines and man-machine systems on the risk criteria of accidents and disasters," *J. of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 47, no. 5, pp. 442–450. September, 2018.
12. Ananin V. G., G.I. Odnokopylov, and Kalinichenko V.S., "Multichannel strain gauge system for static or dynamic testing of metal structures of construction machines," R.F. Patent RU 101811 U1, January 27, 2011.
13. Kalinichenko, V. S., and V. G. Ananin, "The results of experimental research and analysis of the stress state of the metal structure of the pantograph-type elevator," *Interstroymekh-2012: materials of International. scientific and technical conf.*, Izhevsk, Russia, pp. 3-6, October, 2012.
14. Kalinichenko, V.S., "Experimental studies of a mobile pantograph-type elevator using the thermal imaging method," *In the collection: Modern equipment and technologies: problems, state and prospects. Materials of the III All-Russia. scientific and technical conf.*, Rubtsovsk, Russia, pp. 263-267, December, 2013.

Kalinichenko Vladimir Sergeevich – senior lecturer of the Department of construction and road machines, deputy Dean of the Mechanics and Technology Faculty, Tomsk State University of Architecture and Building, 8(3822)653468, e-mail: kvs-2010@mail.ru.

Vlasov Yuriy Alekseevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Automobile Transport and Electrical Engineering, Dean of the Mechanics and Technology Faculty, Tomsk State University of Architecture and Building, 8(3822)653468, e-mail: yury2006@yandex.ru.