

УДК 681.7

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-236-245

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: v.hayr10004@mail.ru

Георгий Алексеевич Куриленко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов, тел. (383)346-17-77, e-mail: teormech@ngs.ru

Рассмотрена работа оптико-механических приборов в процессе их эксплуатации. В статье описана разработка более совершенных методов обеспечения необходимой точности метрологических измерений и механической надежности этих приборов. В рамках метрологического аспекта рассмотрена конструкция виброзащитной платформы, состоящей из балки квазиулевого жесткости, связанной с упругими элементами. Платформа обеспечивает высокий эффект защиты от вибраций и может использоваться как при изготовлении, так и при эксплуатации прибора. Настройка упругого подвеса на фактическую нагрузку осуществляется автоматически. При эксплуатации прибора также требуется обеспечение его прочности в экстремальных условиях. Для этого нужно с высокой достоверностью знать прочностные характеристики материалов деталей приборов. Представлен разработанный нами термографический способ определения характеристик статической трещиностойкости металлов, позволяющий существенно повысить точность их определения и при этом снизить трудоемкость.

Ключевые слова: защита от вибрации, достоверность измерений, термографический метод, трещиностойкость.

Введение

При проведении современных экспериментальных исследований оптическим методом необходимо обеспечить высокоточное пространственно-временное измерение, а также надежность и стабильность работы источника света. Особенно эта проблема актуальна при проведении оптических измерений в открытой атмосфере, когда источник излучения находится на подвижной

платформе либо на летательном аппарате. В этом случае оптико-механические приборы и лазеры, используемые для метрологических измерений, эксплуатируются в экстремальных условиях при значительных внешних нагрузках. При этом оптическая система должна обладать достаточной прочностью, надежностью и обеспечивать необходимую точность измерений.

Решение этой актуальной проблемы следует рассматривать в двух аспектах.

Первый аспект – технологический, требующий виброзащиты оптических систем при их производстве от фоновой вибрации производственных и лабораторных помещений.

Второй аспект – эксплуатационный, требующий, с одной стороны, обеспечения прочностной надежности отдельных узлов и в целом оптической системы, а, с другой стороны, достаточной точности проводимых измерений в условиях вибрационных и других воздействий при их эксплуатации.

Цель и методика исследования

В настоящее время разработано множество различных конструкций виброзащитных устройств, каждое из которых имеет свою область применения. Об универсальном устройстве пока говорить еще рано, но, как отмечают авторы работ [1–6], самой актуальной остается проблема повышения качества виброзащиты. Это и является целью работы.

В исследовании [1] разработана виброзащитная платформа с упругим элементом (рис. 1), позволяющая получить существенное продвижение в решении этой проблемы.

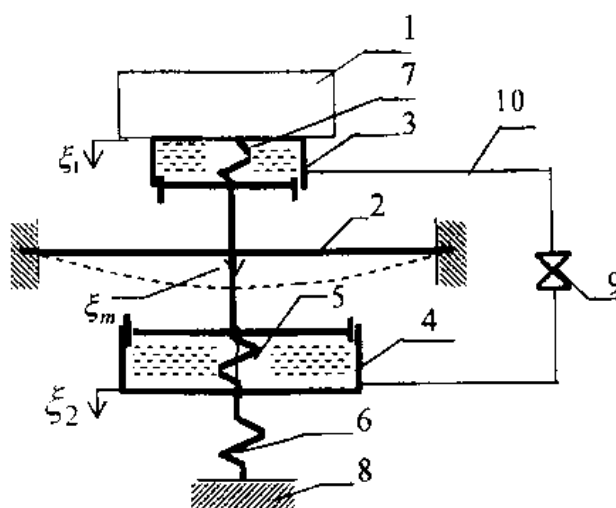


Рис. 1. Виброзащитная платформа

Защищаемый прибор 1 опирается на подвес 2 в виде продольно-сжатой балки (рессоры) квазиинулевой жесткости и пружину 6 через гидроцилиндры 3 и 4.

Полости этих гидроцилиндров соединяются каналом 10 со встроенным дросселем 9. Цилиндро-поршневые пары 3 и 4 содержат также упругие элементы 7 и 5 вспомогательного нагружения. Расчетное положение прибора (рабочую точку) устанавливают, изменяя натяг пружины 6.

Платформа работает следующим образом. При увеличении, например, веса прибора 1 повышается давление в гидроцилиндре 3 и начинается переток жидкости в гидроцилиндр 4, в результате чего увеличивается натяг пружины 6. Благодаря этому рабочую точку подвеса 2 можно удерживать на прежнем уровне. Время перетекания жидкости при этом должно быть существенно больше периода колебаний прибора 1 на подвесе 2 и регулируется величиной проходного сечения канала дросселя 9.

В качестве обобщенной координаты выберем координату ξ_1 , отсчитываемую от положения равновесия защищаемого прибора 1 с массой m . Тогда уравнение движения прибора 1 при кинематическом возмущении основания 8 можно записать в виде

$$m\ddot{\xi}_1 = -K_1\xi_M - K_3\xi_M^3 - C_3\xi_2 - b\dot{\xi}_1 + A\sin\omega t, \quad (1)$$

где K_1, K_3 – коэффициенты упругой жесткости рессоры 2; ξ_M – ее максимальный прогиб; A, ω – амплитуда и частота колебаний основания 8; C_3 – коэффициент жесткости пружины 6; b – коэффициент вязкого трения (на рис. 1 демпфер вязкого трения не показан); ξ_2 – перемещение цилиндра 4.

В исследовании [1] описана работа рассмотренной выше виброзащитной платформы при различных ее параметрах на основе уравнения (1). Найдены оптимальные сочетания параметров, при которых платформа дает высокий эффект виброзащиты. При этом перестройка «рабочей точки» упругого подвеса на фактическую нагрузку выполняется автоматически.

В рамках второго аспекта на этапе изготовления оптико-механических приборов необходимо обеспечить их расчетную статическую и циклическую прочность, для чего нужно как можно точнее знать соответствующие механические характеристики материалов основных силовых деталей.

Эти характеристики определяются экспериментально на специальных образцах с заранее созданной трещиной (надрезом). При этом используются либо плоские образцы с центральной или краевой трещинами (рис. 2), либо цилиндрические образцы с кольцевой трещиной. Перед испытаниями необходимо нарастить надрез усталостной трещиной длиной не менее 1,5 мм.

При стандартных испытаниях [3–5] строятся диаграммы « $P - V$ », где P – приложенная сила, V – смещение берегов трещины. Целью этих испытаний является фиксация момента страгивания трещины. Этому моменту соответствует расчетная нагрузка P_Q , по которой затем и рассчитываются все необходимые характеристики трещиностойкости.

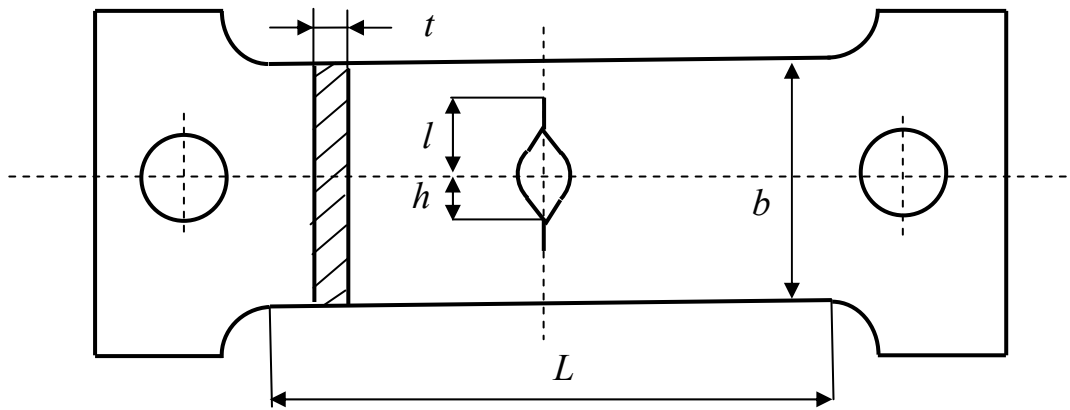


Рис. 2. Образец для испытаний:

$$L = 150 \text{ мм}, b = 50 \text{ мм}, t = 9 \text{ мм}, l = 10 \text{ мм}, h = 7 \text{ мм}$$

При хрупком разрушении расчетной нагрузке P_Q соответствует или максимум, или локальный максимум нагрузки, т. е. момент срагивания трещины удается зафиксировать довольно точно. Диаграммы « $P - V$ », соответствующие упруго-вязкому или вязкому разрушению, характеризуются отсутствием локальных максимумов нагрузки, что затрудняет фиксацию расчетной нагрузки. Для этой цели рекомендуется следующее построение: проводят 5 %-ю секущую, и расчетная нагрузка P_Q определяется как ордината пересечения этой секущей с кривой « $P - V$ » [3–6]. Проведением 5 %-й секущей пытаются отделить геометрическую нелинейность, определяющую 2 %-е подрастание трещины, после которого, как считается, начинается движение трещины, от физической нелинейности, связанной с развитием интенсивной пластической деформации в кончике трещины (рис. 3).

Однако при таком традиционном подходе расчетная нагрузка P_Q определяется с недостаточной точностью, поскольку не учитываются индивидуальные особенности испытываемого материала, а также довольно затруднительным является проведение самой 5 %-й секущей. Также из-за того, что при вязком разрушении трещина может распространяться внутри материала, невозможно использовать некоторые альтернативные методы, например, оптические. Может оказаться затруднительным сам факт обнаружения разрушения, поскольку поврежденность на фронте трещины растет постепенно, так как происходит рост и слияние микропор. Кроме того, при подготовке образцов к эксперименту требуется нанесение усталостных трещин от вершин надрезов на глубину порядка 0,3 мм, что является достаточно трудоемкой операцией.

Исследования проводились на плоских образцах из стали 20.

Для более точной фиксации расчетной нагрузки использовался термографический параметр ΔT – изменение температуры в кончике трещины за достаточно малый промежуток времени. Испытания проводились на шестнадцати

плоских образцах (см. рис. 2) с центральными трещинами нормального отрыва согласно модели I линейной механики разрушения [3–8]. Наряду с построением традиционных диаграмм « $P - V$ », строились диаграммы « $P - \Delta T$ », которые затем перестраивались в диаграммы « $P - \Delta S$ », где ΔS – приращение удельной энтропии в пластической зоне развития трещины. Сопоставлением этих двух термодинамических диаграмм с диаграммой « $P - V$ » устанавливалась корреляционная связь между их характерными точками.

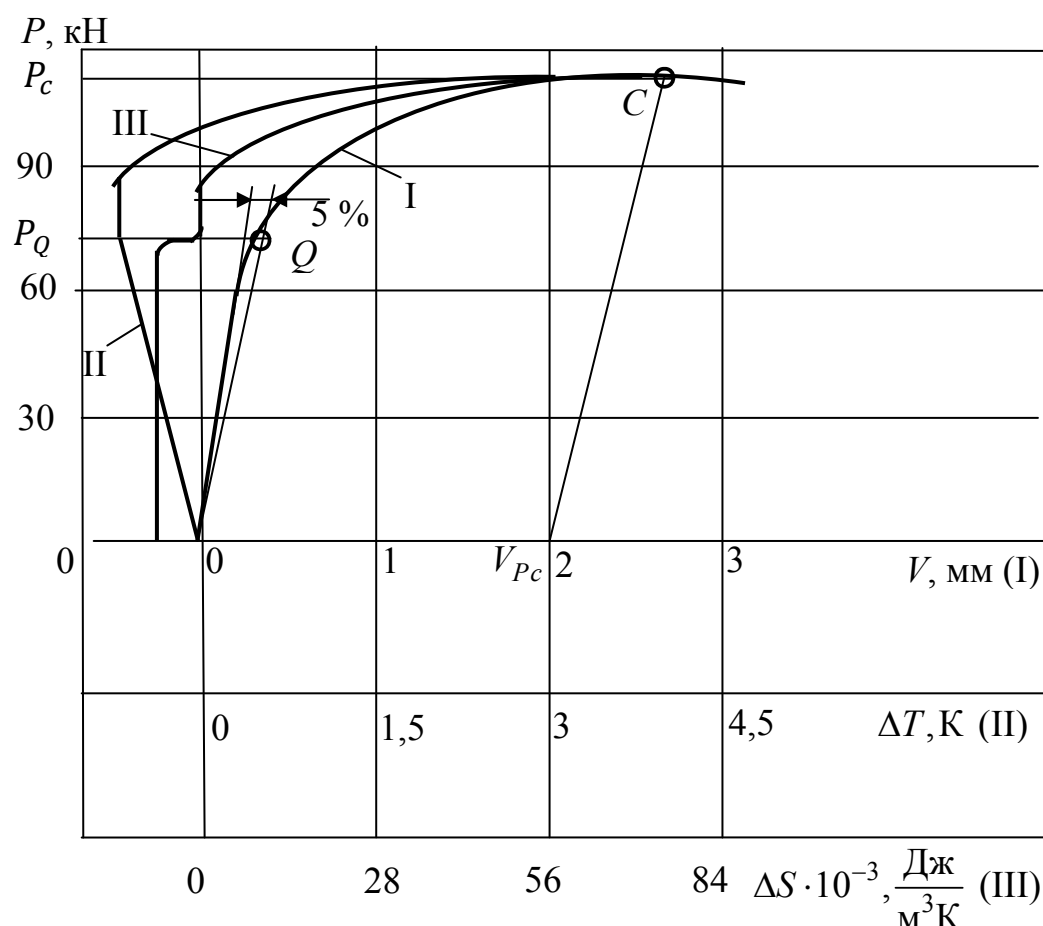


Рис. 3. Диаграммы « $P - \Delta V$ » (I), « $P - \Delta T$ » (II), « $P - \Delta S$ » (III), полученные при испытании образца с усталостной трещиной (1-я группа образцов)

Размеры образцов были выбраны согласно рекомендациям в работе [5]. На половине образцов (1-я группа), как этого требует стандартная методика, перед испытаниями от вершины надрезов были наработаны усталостные трещины, а на остальных образцах (2-я группа) усталостные трещины были заменены острыми тонкими пропилами. Усталостная трещина создавалась от исходного надреза при коэффициенте асимметрии цикла нагружения $R = 0,1$.

Характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) определялись по результатам однократных статических испытаний данных образцов на уни-

версальной гидравлической машине УГ-20. Температура в кончике трещины фиксировалась с помощью тепловизора «Ага-750», имеющего чувствительность $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при включенном механизме сканирования. При наблюдении за точкой механизм сканирования отключали, при этом чувствительность тепловизора возрастала на порядок.

При испытаниях образцов из стали 20 в кончиках трещины происходят упругопластические деформации с образованием большой пластической зоны. В таких случаях в качестве наиболее достоверных характеристик вязкости разрушения принимают: K_{QT} – критический КИН для образца данной толщины, K_c^* – условный критический КИН, соответствующий квазихрупкому разрушению, δ_c – раскрытие в вершине трещины при максимальной нагрузке P_c .

На рис. 3 для одного из образцов 1-й группы показаны диаграммы « $P-V$ », « $P-\Delta T$ ». Вторая диаграмма затем была перестроена в диаграмму « $P-\Delta S$ » по формуле [9–11]

$$\Delta S = c_v \ln(T_2 / T_1). \quad (2)$$

Здесь c_v – удельная теплоемкость материала; T_1 и T_2 – температуры в вершине трещины в конце и начале данного промежутка времени.

Заметим, что в качестве основного параметра движения трещины мы выбрали ΔS , поскольку энтропия является наиболее полной диссипативной функцией, учитывающей все необратимые процессы в кончике растущей трещины.

В формуле (2) ΔS – та часть потока произведенной энтропии, которая идет только на нагрев очага повреждаемости. Этот поток энтропии и адекватен рассматриваемой задаче, поскольку при пластическом деформировании практически вся энергия переходит в тепло.

Аналогичные испытания были проведены и для образцов 2-й группы, у которых пропилены делались заточенной ножовкой толщиной $0,3\text{ мм}$.

Обсуждение результатов

1. Диаграмма « $P-V$ » для образцов 2-ой группы оказалась непригодной для определения характеристик трещиностойкости. Этого и следовало ожидать, поскольку у этих образцов не была соблюдена апробированная строго регламентированная технология их подготовки к испытаниям [7] – не нанесена усталостная трещина. А диаграммы « $P-\Delta T$ » и « $P-\Delta S$ » для всех испытанных образцов обеих групп оказались практически идентичными [2, 8, 12–14].

2. На этих диаграммах видны три ярко выраженные зоны, имеющие ясный физический смысл: вначале (1-я зона) происходит небольшое понижение температуры, связанное с эффектом Томсона, затем разогрев материала за счет микропластического деформирования компенсирует эффект Томсона, и происходит стабилизация температуры (2-я зона), и, наконец, начинается резкое по-

вышение температуры за счет выделения энергии при пластическом деформировании (3-я зона).

3. Определенные точки коррелируют с характерными точками на диаграмме « $P - V$ »: ординаты точки на границе между 1-й и 2-й зонами практически соответствуют ординате точки Q на диаграмме « $P - V$ », а точки C , соответствующие максимальной нагрузке, практически совпадают.

Экспериментально полученным расчетным точкам (из диаграммы « $P - V$ ») были определены все необходимые характеристики трещиностойкости для образцов 1-й группы, а по термодинамической диаграмме « $P - \Delta S$ » – для всех образцов обеих групп.

4. Проведенной статистической обработкой рассчитанных параметров [15] были определены доверительные интервалы и среднеквадратические отклонения полученных характеристик по диаграммам « $P - V$ » и « $P - \Delta S$ ».

Из рассчитанных доверительных интервалов видно, что характеристики трещиностойкости, рассчитанные по диаграмме « $P - \Delta S$ », лежат кучнее, чем характеристики, рассчитанные по диаграмме « $P - V$ », и точность их определения повысилась на 30 %. Такой результат можно объяснить тем, что график « $P - \Delta S$ » имеет резко выраженный излом в районе расчетной точки, по которому эту точку легко зафиксировать. Этот излом имеет и четкую физическую интерпретацию: он соответствует началу процесса интенсивного пластического деформирования, который подтверждается экспериментально. В момент скачкообразного изменения начинается движение трещины, которое фиксируется в испытаниях.

Заключение

1. Разработанная платформа квазиулевого жесткости позволила улучшить виброизоляция оптических приборов как в процессе их изготовления, так и при эксплуатации, что существенно повысило их метрологическую точность.

2. Использование предложенного термографического способа определения характеристик статической трещиностойкости снизило трудоемкость испытаний и повысило точность расчета этих характеристик, что увеличивает прочностную надежность оптических приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kurilenko G. A., Yur'ev G. S., Rykov A. A. Synthesis of an Active Vibrational Protection System // Russian Engineering Research. – 2014. – No. 7. – P. 440–443.
2. Kurilenko G. A., Ayrapetyan V. S. Determination of the Fracture Toughness of Optomechanical Devices // Optics and Photonics Journal. – 2016. – No. 6. – P. 298–304.
3. Хеллан К. Введение в механику разрушения / под ред. Е. М. Морозова ; пер. с англ. – М., 1988. – 364 с.
4. Ковчик С. В., Морозов Е. М. Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие / под ред. В. В. Панасюка. – Киев : Наукова думка, 1988. Т. 3. – 435 с.

5. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев : Наукова думка, 1971. – 359 с.
6. Справочник машиностроителя / под ред. Н. С. Ачеркана. – М. : Машиностроение, 1960. – Т. 2. – 740 с.
7. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М. : Изд. стандартов, 1985. – 61 с.
8. А.с. СССР № 1820278, МКИ³ G 01 N 3/00; Способ определения трещиностойкости материалов / Г. А. Куриленко, А. Б. Пшеничный. – Заявл. 21.03.1990; опубл. 07.06.93, Бюл. № 21. – 14 с.
9. Базаров И. П. Термодинамика. – М. : Высшая школа, 1983. – 344 с.
10. Kurilenko G. A. Quantitative infrared investigations through the intensity of thermal source in the domain of damaging // Proc. of the 4th Intern. Workshop «Advanced Infrared Technology and Applications». – Firenze (Italy), 1997. – P. 177–188.
11. Айрапетян В. С., Куриленко Г. А. Анализ точности определения индивидуальных пределов выносливости термографическим способом // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Национ. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность-2017» : сб. материалов (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 134–140.
12. Айрапетян В. С., Куриленко Г. А. Прогнозирование циклического ресурса бездефектных (без начальных трещин) деталей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 49–55.
13. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент : Фан, 1979. – 167 с.
14. Куриленко Г. А., Пшеничный А. Б., Труфанова Т. В. Оценка повреждаемости циклически деформируемых деталей с макротрещинами // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 3. – С. 46–49.
15. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М. : Физматгиз, 1962. – 349 с.

Получено 21.01.2019

© В. С. Айрапетян, Г. А. Куриленко, 2019

INCREASING ACCURACY AND PROVIDING RELIABILITY OF OPTOMECHANICAL DEVICES IN THE PROCESS OF MEASUREMENT OPERATION

Valeric S. Ayrapetian

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Head of the Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: v.hayr10004@mail.ru

George A. Kurilenko

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, Department of Strength of Aircrafts, phone: (383)346-17-77, e-mail: teormech@ngs.ru

The paper represents the analysis of optomechanical devices in their operation process. The objective of the paper is the development of more sophisticated methods for providing the required measurement accuracy and mechanical durability of optical instruments. In the frame of metrologi-

cal aspect the article examines the anti-vibration pedestal, consisting of a beam with quasi zero stiffness connected to some elastic elements. The pedestal ensures high vibration protection effect and can be used both in development and operation of the device. The adjustment of elastic hanger to actual load is done automatically. In operating the device it is also necessary to ensure its working properly under extreme conditions. For that one needs to know exactly the strength characteristics of material parts of the instruments. We, the authors, represent our new thermographic method for determination of static crack resistance characteristics of metals. Our method allows to do it with much higher accuracy together with less labour intensity.

Key words: vibration protection, measurement reliability of measuring, thermographic method, crack resistance.

REFERENCES

1. Kurilenko, G. A., Yur'ev, G. S., & Rykov, A. A. (2014). Synthesis of an Active Vibrational Protection System. *Russian Engineering Research*, 7, 440–443.
2. Kurilenko, G. A., & Ayrapetyan, V. S. (2016). Determination of the Fracture Toughness of Optomechanical Devices. *Optics and Photonics Journal*, 6, 298–304.
3. Khellan, K. (1988). *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya [Introduction to fracture mechanics]*. E. M. Morozov (Ed.). Moscow: Mir Publ., 364 p. [in Russian].
4. Kovchic, S. V., & Morozov, E. M. (1988). *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: T. 3 [Fracture mechanics and strength of materials]: Vol. 3*. Kiev: Naukova Dumka Publ., 435 p. [in Russian].
5. Pisarenko, G. S., Yakovlev, A. P., & Matveev, V. V. (1971). *Vibropogloshchayushchie svoystva konstruktsionnykh materialov [Vibroextincting properties of materials]*. Kiev: Naukova Dumka Publ. 359 p. [in Russian].
6. Acherkan, N. S. (Ed.). (1960). *Spravochnik mashinostroitel'ia: T. 2 [Reference book of designer: Vol. 2]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. 740 p. [in Russian].
7. Standarts Russian Federation. (1985). GOST 25.506-85. Calculations and tests of strength. Methods of mechanical testing of menals. Characterization of fracture toughness at static nagruzhenii. Moscow: Standartinform Publ., 61 p. [in Russian].
8. Kurilenko, G. A., & Pchenichny, A. B. (1992). Method for determination of crack resistance of materials. *Patent USSR No. 1820278, MKI³ G 01 N 3/00*. IP USSR [in Russian].
9. Bazarov, I. P. (1983). *Termodinamika [Thermodynamics]*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 344 p. [in Russian].
10. Kurilenko, G. A. (1997). Quantitative infrared investigations through the intensity of thermal source in the domain of damaging. In *Proceedings of the 4th International Workshop: Advanced Infrared Technology and Applications* (pp. 177–188). Firenze, Italy.
11. Ayrapetyan, V. S., & Kurilenko, G. A. (2017). Analysis of accuracy of individual endurance limit definition by thermographic method. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Nauka. Oborona. Bezopasnost' [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Science. Defense. Security]* (pp. 134–140). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
12. Ayrapetyan, V. S., & Kurilenko, G. A. (2016). Prediction of cyclic resource pieces without initial cracks. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: SibOptika-2016 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: SibOptics-2016]* (pp. 49–55). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
13. Fedorov, V. V. (1979). *Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrusheniya tverdykh tel [Thermodynamic aspects of durability and destruction of solids]*. Tashkent: Fan Publ., 167 p. [in Russian].

14. Kurilenko, G. A., Pshenichnyy, A. B., & Trufanova, T. V. (1992). Evaluation of damage cyclically deformable parts with macrocracks. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'* [Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing], 3, 46–49 [in Russian].

15. Linnic, Yu. V. *Method naimenshikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudiniy* [Method minimum squares and principles theory of experiments working up]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 349 p. [in Russian].

Received 21.01.2019

© V. S. Ayrapetian, G. A. Kurilenko, 2019