

Машиностроение и машиноведение

УДК 620.179.13

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-3-10

Термографический способ неразрушающего контроля циклической прочности в производственных условиях

В.С. Айрапетян¹, Г.А. Куриленко²

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Новосибирск, Российская Федерация, ул. Плахотного, д. 10

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, Российская Федерация, пр-т Карла Маркса, д. 20

Thermographic Non-Destructive Testing of Fatigue Strength in Operating Conditions

V.S. Ayrapetyan¹, G.A. Kurilenko²

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Novosibirsk, Russian Federation, Plakhotnogo St., Bldg. 10

² Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russian Federation, K. Marx Ave., Bldg. 20

@ e-mail: v.s.ayrapetyan@snga.ru

i Предложен термографический способ неразрушающего контроля циклической прочности, заключающийся в следующем. Предварительно для конкретной выборки деталей данного технологического уровня производства по ранее разработанной методике определяются индивидуальные пределы выносливости, а затем — контрольное напряжение, равное статистически установленному нижнему значению предела выносливости для деталей этой выборки, рассчитанному с заданной доверительной вероятностью. После этого вычисляется критическое приращение энтропии за один цикл колебаний как верхнее значение приращения удельной энтропии для тех деталей из контрольной выборки, у которых предел выносливости равен или больше контрольного напряжения. Контроль циклической прочности деталей состоит в их испытаниях на уровне контрольного напряжения. При испытаниях деталь выводят на начало второй стадии циклического нагружения (на стадию относительной стабилизации) и за несколько циклов получают фактическое приращение энтропии за один цикл. Если оно меньше или равно критическому приращению энтропии, то деталь признают годной и наоборот. При прохождении всех этапов испытаний годных деталей у них практически сохраняется циклический ресурс.

Ключевые слова: индивидуальный предел выносливости, контрольное напряжение, доверительная вероятность, циклическое нагружение

i The authors propose a thermographic method of non-destructive testing of fatigue strength that includes the following steps. First, individual fatigue limits are determined for a batch of samples of a certain manufacturing level using a pre-developed technique, followed by the determination of the control stress equal to the statistically established lower fatigue

limit for the sampled parts calculated with a pre-set confidence factor. Subsequently, the critical entropy increment per oscillation cycle is calculated as the upper value of the specific entropy increment for those sampled parts that have the fatigue limit equal or exceeding the control stress. Fatigue strength testing resides in testing of parts at the control stress level. During testing, a part is brought to the beginning of the second stage of cyclic loading (relative stabilization stage), and the actual entropy increment per cycle is obtained after several loading cycles. If it is less or equal to the critical entropy increment, the part is considered fit for use and vice versa. When passing through all the testing stages, the acceptable parts largely retain their cyclic life.

Keywords: individual fatigue limit, control stress, confidence probability, cyclic loading

Инженерная практика показывает, что в области циклической прочности самым актуальным является вопрос о том, сумеет ли конкретная деталь отработать положенный ей ресурс или выйдет из строя раньше времени.

Целью работы является ответ на этот вопрос с помощью разработанного нами надежного термографического способа неразрушающего контроля циклической прочности серийно выпускаемых изделий в производственных условиях.

В основу способа положена следующая идея. Как установлено ранее [1–3], на второй стадии циклического деформирования детали (на стадии относительной стабилизации), фактически определяющей ее циклический ресурс, физико-механические характеристики детали (коэффициент поглощения энергии ψ , температура T и др.) практически стабилизируются, если она работает при амплитудных напряжениях σ_a , не превышающих ее фактический предел выносливости σ_R (рис. 1). Заметим, что при $\sigma_a > \sigma_R$ в конце второй стадии нагружения коэффициент поглощения энергии ψ резко возрастает и происходит разрушение.

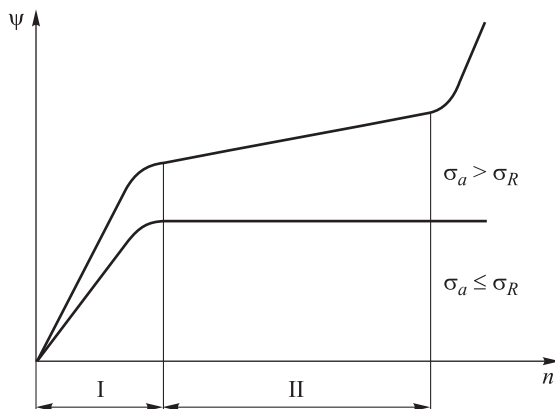


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения энергии ψ от числа циклов n :
I — первая стадия; II — вторая стадия

Далее необходимо установить уровень так называемого контрольного напряжения σ_k . При этом индивидуальные пределы выносливости σ_R определяются неразрушающим способом по разработанной методике [4, 5] для контрольного объема выборки деталей данного технологического уровня производства. Суть этой методики состоит в том, что для конкретной детали проводят ее поэтапное циклическое нагружение с увеличивающейся от этапа к этапу амплитудой напряжения σ_a .

В начале стадии относительной стабилизации температуры на каждой ступени измеряют температуру в начале T_1 и конце T_2 цикла колебаний в какой-либо точке детали, расположенной как можно ближе к предполагаемому очагу повреждаемости, и подсчитывают приращение производимой удельной энтропии в очаге, вызывающей его непосредственный нагрев, по известной формуле

$$\Delta S^{(1n)} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$$

где C_v — удельная теплоемкость материала, для стали $C_v = 5,16 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К).

После этого строят график $\Delta S^{(1n)} = f(\sigma_a)$, абсциссу излома которого принимают за σ_R . Поскольку время нагружения на каждой ступени невелико, циклический ресурс детали практически сохраняется. В этом заключается принципиальное отличие разработанного способа от классического метода Велера, являющегося разрушающим и позволяющего определять только предел выносливости материала.

Затем проводят статистическую обработку полученных результатов, считая контрольное напряжение σ_k равным статистически установленному нижнему значению предела выносливости, рассчитанному с заданной (95%-или 90%-ной) доверительной вероятностью.

Теперь можно отбраковать те детали, у которых $\sigma_R < \sigma_k$, так как они с большой вероят-

ностью не отработают свой ресурс. А для деталей, имеющих $\sigma_R \geq \sigma_k$, целесообразно провести второй термодинамический этап контроля, предполагающий следующее. Для этих деталей, выведенных в начало второй стадии циклического нагружения на уровне σ_k , определяют приращение удельной энтропии за один цикл колебаний $\Delta S_i^{(1ц)}$ по формуле (1). Затем рассчитывают критическое приращение энтропии за один цикл $\Delta S_{кр}^{(1ц)}$ как верхнее значение $\Delta S_i^{(1ц)}$.

Контроль циклической прочности деталей данного технологического уровня производства заключается в их испытаниях на уровне σ_k . При испытаниях деталь выводят на начало второй стадии циклического нагружения и за несколько циклов определяют фактическое приращение энтропии за один цикл $\Delta S^{(1ц)}$. Если

$$\Delta S^{(1ц)} \leq \Delta S_{кр}^{(1ц)}, \quad (2)$$

то деталь признают годной и наоборот. Следует отметить, что при прохождении всех этапов испытаний годных деталей у них практически сохраняется циклический ресурс.

Термографическая методика была внедрена на ряде крупных предприятий нашей страны. В качестве примера рассмотрим контроль циклической прочности пружин челнока ткацкого станка, изготавливаемого на заводе «Сибтекстильмаш».

Пружина челнока, выполняемая из стали 50ХФА, является одной из основных деталей ткацкого станка серии СТБ (рис. 2), работающих в очень напряженном силовом режиме. Механические характеристики стали 50ХФА: предел текучести $\sigma_T = 1400$ МПа; временное сопротивление $\sigma_B = 1600$ МПа; предел выносливости $\sigma_{-1} = 550$ МПа.

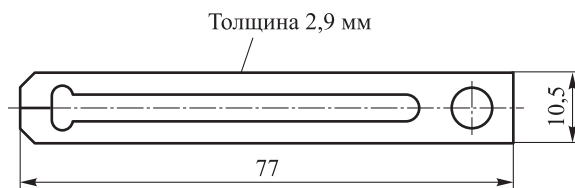


Рис. 2. Схема пружины челнока

Губки пружины, предварительно заневоленные до усилия 25 Н, в условиях эксплуатации периодически с частотой $f = 2$ Гц раздвигаются кулачком, затем захватывают нить и протаскивают ее по всей ширине полотна.

Согласно принятому на заводе технологическому процессу, в каждой партии пружин (1500...2000 шт.) испытывалась выборка из 10 шт. на специальном многопозиционном стенде путем периодического размыкания губок вращающимся кулачком. Амплитуда прогиба каждой губки составляла 5 мм, что в 2 раза больше ее деформации в условиях эксплуатации. Максимальные напряжения в пружине $\sigma_{max} = 1284$ МПа, что в 1,65 раз превышает их эксплуатационные значения ($\sigma_{max}^э = 778$ МПа). Всю партию признавали годной, если из 10 пружин разрушались не более 7 шт. В противном случае испытывали новую выборку пружин и при повторном отрицательном результате браковали всю партию.

Такой принятый на заводе метод контроля качества пружин не выдерживает никакой критики, поскольку он с весьма сомнительной вероятностью прогнозирует надежность изделий. Это подтверждали и многочисленные рекламации, поступавшие на пружины. Поэтому завод был вынужден поставлять ткацким фабрикам, на которых эксплуатировались

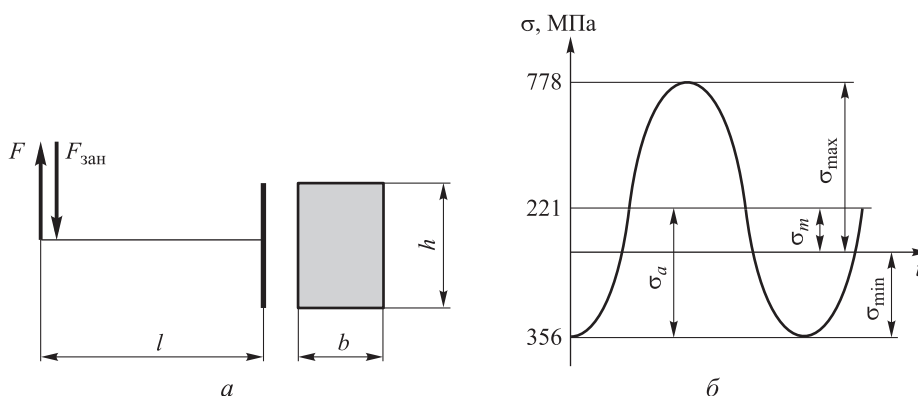


Рис. 3. Схема нагружения губки пружины (а) и один цикл изменения напряжений σ в опасных точках с учетом заневоливания пружины (б)

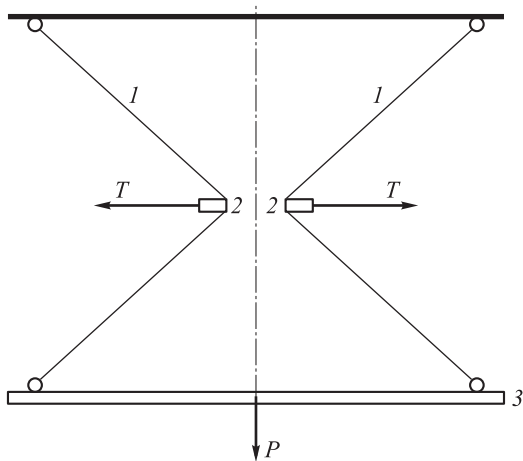


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:
1 — струны; 2 — губки; 3 — якорь

станки СТБ, большие комплекты запасных пружин.

Сначала нами была предпринята попытка использовать для контроля качества пружин метод внутреннего трения [6, 7]. Но он не оправдал себя, так как по техническим причинам оказалось невозможным с нужной точностью определять коэффициент поглощения энергии вследствие малых размеров изделия.

Примененный затем термографический способ [3, 8] позволил решить эту проблему. Был спроектирован и изготовлен двухпозиционный испытательный стенд. Для измерения температуры в очаге накопления повреждаемости разработан специальный радиометр. Контроль качества пружин выполнен по предложенной методике.

На рис. 3, а показана схема нагружения губки ($l = 65$ мм; $b = 3,25$ мм; $h = 2,9$ мм), а на рис. 3, б — один цикл изменения напряжений в опасных точках с учетом заневоливания пружины, где σ_{\max} , σ_{\min} и σ_m — соответственно максимальное, минимальное и среднее напряжение. Губку пружины можно представить как консольно нагруженную балку (F — сила, раздвигающая губки; $F_{\text{зан}}$ — усилие заневоливания) с прямоугольным поперечным сечением. Осевой момент сопротивления сечения $W = bh^2/6 = 4,56$ мм³. Максимальные напряжения в губке при ее заневоливании возникают в сечении вблизи защемления $\sigma_{\max}^{\text{зан}} = F_{\text{зан}}l/W = \pm 356$ МПа.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Якорь притягивается к вибратору с переменной силой P , и натянутые струны силой T

заставляют губки пружины совершать колебательные движения.

Для нахождения контрольного напряжения σ_k была испытана партия из 50 пружин. Сначала для каждой из них определили индивидуальный предел выносливости σ_{Ri} (табл. 1).

Затем путем статистической обработки полученных индивидуальных пределов выносливости пружин рассчитали контрольное напряжение σ_k как нижнее значение 95%-ного доверительного интервала для генерального среднего значения σ_{Ri} . Сравнение значений σ_{Ri} (см. табл. 1) и σ_k (табл. 2) показало, что у 30 пружин $\sigma_R > \sigma_k$ и они с большой долей вероятности окажутся годными, т. е. отработают положенный им ресурс $n_p = 10^6$ циклов, а у 20 пружин $\sigma_R < \sigma_k$, и они, скорее всего, ресурс не отработают. Эти 20 пружин были сразу доведены до разрушения, и действительно оказалось, что их циклический ресурс $n_i < n_p$. Результаты расчета контрольного напряжения σ_k приведены в табл. 2.

Первые 30 пружин подвергли дополнительному испытанию. На уровне σ_k их доводили до начала второй стадии нагружения, и за небольшое число циклов по формуле (1) определяли $\Delta S_i^{(1u)}$. Результаты расчета приращения удельной энтропии за один цикл колебаний приведены в табл. 3, где T_1 и T_2 — температура очага в начале второй стадии нагружения и через n циклов.

Затем рассчитали среднее значение приращения энтропии за один цикл

$$\Delta S_{\text{ср}}^{(1u)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(1u)} = 0,1015 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) \quad (3)$$

и ее выборочную дисперсию

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta S_i^{(1u)})^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \Delta S_i^{(1u)} \right)^2}{n-1}} = 0,0183 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

И, наконец, с учетом формул (2) и (3) определили критическое изменение энтропии за один цикл колебаний

$$\Delta S_{\text{кр}}^{(1u)} = \Delta S_{\text{ср}}^{(1u)} + z_p \frac{s_n}{\sqrt{n}} = 0,11 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Таблица 1

**Значения индивидуального предела
выносливости пружин**

Номер пружины	σ_{Ri} , МПа	Номер пружины	σ_{Ri} , МПа	Номер пружины	σ_{Ri} , МПа
1	952	18	902	35	841
2	807	19	870	36	797
3	948	20	790	37	830
4	920	21	950	38	950
5	842	22	705	39	695
6	850	23	1060	40	700
7	710	24	955	41	1040
8	793	25	746	42	945
9	600	26	880	43	754
10	785	34	898	44	852
11	760	27	642	45	904
12	1000	28	1100	46	850
13	912	29	847	47	896
14	859	30	740	48	810
15	750	31	888	49	846
16	803	32	750	50	850
17	1010	33	990	-	-

Таблица 2

Результаты расчета параметров

Параметр	Формула для расчета	Результат расчета
Выборочное среднее значение предела выносливости $\widehat{\sigma}_R$, МПа	$\widehat{\sigma}_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Ri}$	874
Выборочное среднее квадратическое отклонение s_n , МПа	$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{Ri}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{Ri} \right)^2}{n-1}}$	111
Квантиль нормированного нормального распределения z_p уровня $p = 0,975$	Таблица III в работе [9]	1,96
Контрольное напряжение σ_k , МПа	$\sigma_k = \widehat{\sigma}_R - z_p \frac{s_n}{\sqrt{n}}$	843

Из табл. 3 следует, что 24 пружины из 30 удовлетворяют критерию годности (1), а шесть пружин под номерами 6, 14, 29, 35, 37, 46 признаны негодными. Для проверки результатов

контроля все 30 пружин были доведены до разрушения на уровне рабочих нагрузок. Оказалось, что пять из шести забракованных и одна из 24 годных пружин разрушились раньше по-

Таблица 3

Результаты расчета приращения удельной энтропии за один цикл колебаний

Номер пружины	σ_{Ri} , МПа	T_1 , К	T_2 , К	$\Delta S_i^{(in)} = C_v \frac{T_2 - T_1}{T_1} \frac{1}{n}$
1	952	294,15	294,23	0,0827
3	948	294,20	294,29	0,0930
4	920	294,17	294,27	0,1030
6	850	294,20	294,33	0,1340
12	1000	293,90	294,97	0,0724
13	912	293,90	293,99	0,0930
14	859	293,95	294,08	0,1340
17	1010	294,09	294,18	0,0930
18	902	294,07	294,16	0,0930
19	870	294,10	294,20	0,1030
21	950	294,20	294,30	0,1030
23	1060	294,15	294,22	0,0724
24	955	294,10	294,19	0,0930
26	880	293,80	293,90	0,1030
28	1100	293,90	293,97	0,0724
29	847	293,95	294,07	0,1240
31	888	293,90	294,01	0,1100
33	990	294,00	294,08	0,0827
34	898	294,00	294,10	0,1030
35	841	294,07	294,19	0,1240
37	830	294,00	294,12	0,1240
38	950	293,75	293,84	0,0930
41	1040	293,80	293,88	0,0827
42	945	293,50	293,60	0,1030
44	852	293,50	293,61	0,1100
45	904	293,40	293,49	0,0930
46	850	293,44	293,56	0,1240
47	896	293,40	293,50	0,1030
49	846	293,39	293,50	0,1100
50	850	293,30	293,40	0,1030

ложенного срока, остальные отработали свой ресурс.

Выводы

1. Полученный результат свидетельствует о возможности применения неразрушающего термографического способа контроля циклической прочности в производственных условиях.

2. Термографический способ позволяет повысить точность контроля по сравнению с из-

вестными методами [1, 2, 9–12], так как в качестве диагностического параметра используется приращение удельной энтропии — наиболее полная диссипативная функция, учитывающая все необратимые процессы в очаге развития повреждаемости. Причем этот параметр рассчитывается по кинетике температурного поля на поверхности тестируемого объекта, которое фиксируется с точностью не менее 0,01 °С с помощью современной бесконтактной инфракрасной техники.

Литература

- [1] Kurilenko G.A. Quantitative infrared investigations through the intensity of thermal source in the domain of damaging. *Advanced Infrared Technology and Applications. Proc. of the 4th International Workshop*, Firenze, 1997, pp. 177–187.
- [2] Kurilenko G.A., Ayrapetyan V.S. Determination of the Fracture Toughness of Optomechanical Devices. *Optics and Photonics Journal*, 2016, no. 6, pp. 298–304.
- [3] Айрапетян В.С., Куриленко Г.А. Прогнозирование циклического ресурса бездефектных (без начальных трещин) деталей. *Специальные вопросы фотоники: Наука. Оборона. Безопасность. Сб. матер. Междунар. науч. конф.*, Новосибирск, 18–22 апреля 2016, Новосибирск, СГУГиТ, 2016, с. 49–55.
- [4] Куриленко Г.А. *Способ определения предела выносливости*. Пат. 1499167 РФ, бюл. № 29, 1989. 154 с.
- [5] Айрапетян В.С., Куриленко Г.А. Анализ точности определения индивидуальных пределов выносливости термографическим способом. *Наука. Оборона. Безопасность. Сб. ст. Национ. науч. конф., Гео-Сибирь 2017*, Новосибирск, 17–21 апреля 2017, Новосибирск, СГУГиТ, 2017, с. 134–140.
- [6] Ахметзянов М.Х., Лазарев И.Б. *Сопротивление материалов*. Москва, Юрайт, 2013. 560 с.
- [7] Dumonlin S., Louche H., Hopperstad O.S., Borvik T. Heat Sources, Energy Storage and Dissipation in High-Strength Steels: Experiments and Modeling. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2010, vol. 29, pp. 461–474.
- [8] Куриленко Г.А., Григорьева Г.В. Развитие термодинамического подхода при исследовании повреждаемости при циклических нагрузках. *СибОптика-2013. Сб. матер. Междунар. науч. конф.*, Новосибирск, 15–26 апреля 2013, Новосибирск, СГГА, 2013, с. 160–164.
- [9] Самарский А.А. *Теория разностных схем*. Москва, Наука, 1983. 616 с.
- [10] Ding P., Wang X. Solutions of the second elastic-plastic fracture mechanics parameter in test specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, vol. 77, pp. 3462–3480.
- [11] Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости. *Деформация и разрушение материалов*, 2011, № 6, с. 1–12.
- [12] Swiderski W. The Characterization of Defects in Multi-layered Composite Materials by Thermal Tomography Methods. *ActaPhysicaPolonica*, 2009, vol. 115, pp. 800–804.

References

- [1] Kurilenko G.A. Quantitative infrared investigations through the intensity of thermal source in the domain of damaging. *Advanced Infrared Technology and Applications. Proc. of the 4th International Workshop*, Firenze, 1997, pp. 177–187.
- [2] Kurilenko G.A., Ayrapetyan V.S. Determination of the Fracture Toughness of Optomechanical Devices. *Optics and Photonics Journal*, 2016, no. 6, pp. 298–304.
- [3] Airapetian V.S., Kurilenko G.A. Prognozirovanie tsiklicheskogo resursa bezdefektnykh (bez nachal'nykh treshchin) detalei [Prediction of the cyclic life of defect-free (without initial crack) of parts]. *Spetsial'nye voprosy fotoniki: Nauka. Oborona. Bezopasnost'. Sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf.* [Special issues in Photonics: Science. Defense. Security. International scientific conference proceedings]. Novosibirsk, 18–22 April 2016, Novosibirsk, SGUGiT publ., 2016, pp. 49–55.
- [4] Kurilenko G.A. *Sposob opredeleniia predela vynoslivosti* [Method for determining the endurance limit]. Patent RF no. 1499167, 1989. 154 p.
- [5] Airapetian V.S., Kurilenko G.A. Analiz tochnosti opredeleniia individual'nykh predelov vynoslivosti termograficheskim sposobom [Analysis of the accuracy of determining individual limits of endurance thermographic method]. *Nauka. Oborona. Bezopasnost'. Natsion. nauchnaia konf., Geo-Sibir' 2017. Sb. st.* [Science. Defense. Security. National scientific conference, geo-Siberia 2017. Collected papers]. Novosibirsk, 17–21 April 2017, Novosibirsk, SGUGiT publ., 2017, pp. 134–140.
- [6] Ahmetzyanov M.H., Lazarev I.B. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Yurayt publ., 2013. 560 p.

- [7] Dumonlin S., Louche H., Hopperstad O.S., Børvik T. Heat Sources, Energy Storage and Dissipation in High-Strength Steels: Experiments and Modeling. *European Journal of Mechanics — A/Solids*, 2010, vol. 29, pp. 461–474.
- [8] Kurilenko G.A., Grigor'eva G.V. Razvitie termodinamicheskogo podkhoda pri issledovanii povrezhdaemosti pri tsiklicheskih nagruzkakh [Development of thermodynamic approach in the study of damage under cyclic loads]. *SibOptika-2013. Mezhdunar. nauch. konf.* [SibOptika-2013. International scientific conference]. Novosibirsk, 15–26 April 2013, Novosibirsk, SGGA publ., 2013, pp. 160–164.
- [9] Samarskii A.A. *Teoriia raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka publ., 1983. 616 p.
- [10] Ding P., Wang X. Solutions of the second elastic-plastic fracture mechanics parameter in test specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, vol. 77, pp. 3462–3480.
- [11] Shtremel' M.A. O edinstve v mnogoobraznykh protsessah ustalosti [The unity in the diverse processes of fatigue]. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Russian metallurgy]. 2011, no. 6, pp. 1–12.
- [12] Swiderski W. The Characterization of Defects in Multi-layered Composite Materials by Thermal Tomography Methods. *ActaPhysicaPolonica*, 2009, vol. 115, pp. 800–804.

Статья поступила в редакцию 11.04.2018

Информация об авторах

АЙРАПЕТЯН Валерик Сергеевич (Новосибирск) — доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Специальные устройства, инноватика и метрология». Сибирский государственный университет геосистем и технологий (630108, Новосибирск, Российская Федерация, ул. Плеханова, д. 10, e-mail: v.s.ayrapetyan@ssga.ru).

КУРИЛЕНКО Георгий Алексеевич (Новосибирск) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов». Новосибирский государственный технический университет (630073, Новосибирск, Российская Федерация, пр-т Карла Маркса, д. 20).

Information about the authors

AYRAPETYAN Valerik Sergeevich (Novosibirsk) — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Special Devices, Innovation Studies and Metrology Department. Siberian State University of Geosystems and Technologies (630108, Novosibirsk, Russian Federation, Plakhotnogo St., Bldg. 10, e-mail: v.s.ayrapetyan@ssga.ru).

KURILENKO Georgiy Alekseevich (Novosibirsk) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Strength of Aircraft. Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, Russian Federation, K. Marx Ave., Bldg. 20).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Айрапетян В.С., Куриленко Г.А. Термографический способ неразрушающего контроля циклической прочности в производственных условиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7, с. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-3-10.

Please cite this article in English as:

Ayrapetyan V.S., Kurilenko G.A. Thermographic Non-Destructive Testing of Fatigue Strength in Operating Conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 7, pp. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-3-10.