

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-390-396>

УДК 62.419

Деформационное тепло при растяжении стальных элементов

Докт. техн. наук, доц. Е. А. Мойсейчик¹⁾, А. А. Яковлев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Целью работы является приближенная расчетно-экспериментальная оценка удельной энергоемкости и теплообразования на различных стадиях работы материала при растяжении образца. В статье рассмотрен приближенный метод оценки удельной энергоемкости и теплообразования на четырех стадиях деформирования растяжением стального образца. Конечно-элементное моделирование работы изготовленного образца при упруго-пластическом растяжении было выполнено в многофункциональном программном комплексе ANSYS. Нагрузка в цифровой модели образца прикладывалась согласно программе натурных испытаний. В эксперименте использовались плоские образцы по ГОСТ 1497, испытательная машина WAW-1000 с микрокомпьютером 100T, тепловизор testo 875i с температурной чувствительностью 0,05 °С при 30 °С. Сопоставили полученные значения на графиках натурных испытаний и цифровой модели образцов, выявив критические точки и величины отклонений. Поэтапное нагружение выявило, что развитие разрушения происходит на ниспадающих ветвях и сопровождается поэтапным развитием локальной неустойчивости пластического деформирования в форме «шейки». Показано, что температура нагрева растягиваемого металла может быть рассчитана по предлагаемым в статье формулам или расчетом с использованием программного комплекса ANSYS. Результаты испытаний показали, что температуры поверхности образцов на каждой стадии существенно отличаются, выделили четыре основных участка на графике изменения температуры поверхности образца в точке. Выполнен анализ существующей базы измерительных приборов и возможности получения и обработки данных. Экспериментальные величины температур поверхности при непрерывном квазистатическом деформировании превышают их расчетные значения (до 5 раз). Кинетика изменений температурного поля поверхности образца выполнялась термографическими приборами.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, стальные образцы, растяжение, деформационное теплообразование, расчет температуры

Для цитирования: Мойсейчик, Е. А. Деформационное тепло при растяжении стальных элементов / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 390–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-390-396>

Deformation Heat in Tension of Steel Elements

Е. А. Moiseychik¹⁾, А. А. Yakovlev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of the work is an approximate computational and experimental assessment of the specific energy intensity and heat generation at various stages of the material's operation when the sample is stretched. The paper discusses an approximate method for estimating the specific energy intensity and heat generation at four stages of tensile deformation of a steel sample. Finite element modeling of the work of the manufactured sample under elastic-plastic tension was performed in the ANSYS multifunctional software package. The load in the digital model of the sample was applied according to the full-scale test program. The experiment used flat samples in accordance with GOST 1497, a WAW-1000 testing machine with a 100T microcomputer, and a testo 875i thermal imager with a temperature sensitivity of 0.05 °C at 30 °C. We compared the obtained values on graphs of full-scale tests and a digital model of the samples, identifying critical points

Адрес для переписки

Мойсейчик Евгений Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 146а,
20114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 374-96-77
emoisseitchk@mail.ru

Address for correspondence

Moiseychik Evgeny Alekseevich
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: + 375 17 374-96-77
emoisseitchk@mail.ru

and deviation values. Phased loading revealed that the development of destruction occurs on the descending branches and is accompanied by the gradual development of local instability of plastic deformation in the form of a “neck”. It is shown that the heating temperature of the tensile metal can be calculated using the formulas proposed in the paper or by calculation using the ANSYS software package. The test results showed that the surface temperatures of the samples at each stage differ significantly. Four main areas were identified on the graph of changes in the sample surface temperature at a point. An analysis of the existing database of measuring instruments and the ability to obtain and process data was carried out. Experimental values of surface temperatures during continuous quasi-static deformation exceed their calculated values (up to 5 times). The kinetics of changes in the temperature field of the sample surface was carried out using thermographic instruments.

Keywords: stress-strain state, steel samples, stretching, deformation heat generation, temperature calculation

For citation: Moiseychik E. A., Yakovlev A. A. (2024) Deformation Heat in Tension of Steel Elements. *Science and Technique*. 23 (5), 390–396. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-390-396> (in Russian)

Введение

В диагностике получают распространение различные измерительные технологии с использованием высокоточной инфракрасной термографии (ИК-термографии) [1]. Такая тенденция стала возможной благодаря высокой производительности применяемых инфракрасных приборов и высокоточного измерительного оборудования, а также стремительному развитию технологии обработки сигналов. В результате этого инфракрасная термография становится основной составляющей диагностико-измерительных систем с широкой областью применения. Эти системы не ограничиваются традиционным измерением температуры тел по инфракрасному излучению, а распространяются на неразрушающие технологии контроля напряженного состояния твердых тел, выявление предельных состояний конструктивных элементов и трещиноопасных зон в конструкциях, диагностику трещин и т. д.

ИК-технологии работают на тепле искусственно создаваемых в теле источников (активные методы), или тепловых источников, формирующихся в процессах выполнения рабочих функций изделий (пассивные методы). Так, нагрев обмоток электродвигателя в процессе его работы, нагрев или охлаждение стальных элементов при различных видах деформирования и другие – все это относится к пассивным методам теплообразования. Теплообразование при деформировании конструкционных материалов используется в дистанционных технологиях контроля дефектов и прогнозирования работоспособности различных стальных изделий на основе тепловой пассивной инфракрасной термографии [2, 3]. При этом в режиме мониторинга фиксируется

кинетика температурного поля поверхности изделия, конструкции термографическими приборами [10]. При развитии упруго-пластических деформаций в окрестности структурных составляющих материала, конструктивных, технологических или эксплуатационных дефектов, зарождении и развитии трещины в изделии такие зоны становятся источниками теплообразования, вследствие чего изменяется и локальная (у дефекта) температура поверхности изделия. Природа такого деформационного теплообразования рассмотрена в [2].

Из молекулярно-кинетической теории газов известно, что температура газа уменьшается, когда происходит адиабатическое расширение, и, наоборот, его температура увеличивается при адиабатическом сжатии. В твердых телах подобное явление возникает в результате приложения напряжений к материалу исследуемой зоны твердого тела. Это является следствием эффекта термоупругости. В металлических сплавах и других квазиоднородных материалах генерация тепла за счет эффекта термоупругости может быть смоделирована уравнением [4]

$$\Delta T = -\frac{T_\alpha}{c_p \rho} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (1)$$

где T – абсолютная температура исследуемой точки; α – коэффициент теплового расширения материала; c_p – теплоемкость при постоянном напряжении; ρ – плотность материала; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Для расчета ΔT по формуле (1) необходимо получить компоненты тензора напряженного состояния в каждой из исследуемых точек изделия. Такой способ контроля напряженного состояния имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: дистанционные (бес-

контактные) измерения, отсутствие тщательной подготовки поверхности изделия, высокая производительность измерений, низкая стоимость работ и др.

Метод находит применение при диагностике конструкций и узлов ответственных сооружений и машин [1–6]. Так, в работах [5, 6] в эксперименте подтверждается, «что методом экспериментальной термографии по эффекту саморазогрева металла можно достаточно точно и уверенно выявлять вершины усталостных трещин в конструкциях металлических мостов».

Целью настоящей статьи является приближенная расчетно-экспериментальная оценка удельной энергоемкости и теплообразования на различных стадиях работы материала при растяжении образца.

Приближенный расчет теплообразования при одноосном деформировании [7]

При деформировании растяжением стальных элементов (образцов) можно наблюдать четыре стадии их работы (рис. 1). Первая стадия характеризуется упругой работой материала. На второй стадии появляется площадка текучести и затрачивается соответствующая механическая работа. На третьей стадии деформирование растянутого элемента происходит равномерно в пределах рабочей зоны I (рис. 1). На третьей стадии в равномерно деформируемом металле образуется «шейка», зарождение и развитие которой происходит в произвольном сечении рабочей длины l образца. В процессе деформирования в единице объема материала образца накапливается механическая энергия (удельная энергоемкость), которая почти полностью превращается в тепло. Полученное в результате деформации тепло (деформационное тепло) рассеивается в металле образца и окружающей среде. При этом нагрев металла элемента деформационным теплом происходит неодинаково: больше нагреваются участки металла, примыкающие к дефектам. Обобщенная диаграмма деформирования $\sigma-\epsilon$ и теплообразования $t-\epsilon$ представлена на рис. 1.

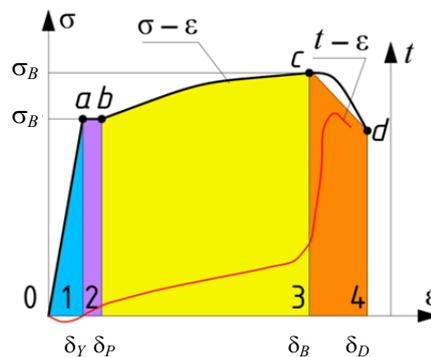


Рис. 1. Обобщенная диаграмма деформирования $\sigma-\epsilon$ и теплообразования $t-\epsilon$

Fig. 1. Generalized diagram of deformation $\sigma-\epsilon$ and heat generation $t-\epsilon$

Удельная энергоемкость a_v при упругой работе элемента составляет:
на первой стадии

$$a_{v1} = \frac{\sigma_T}{2} \delta_Y; \tag{2}$$

на второй стадии

$$a_{v2} = \sigma_T (\delta_P - \delta_Y); \tag{3}$$

на третьей стадии

$$a_{v3} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2} (\delta_B - \delta_P). \tag{4}$$

Обозначая разрушающие напряжения на четвертой стадии деформирования через σ_D , аналогично получаем

$$a_{v4} = \frac{\sigma_B + \sigma_D}{2} (\delta_D - \delta_V). \tag{5}$$

Выполнив обработку данных, определим среднюю температуру стали образцов на каждой из приведенных стадий. Принимаем, что теплообразование происходит за малый промежуток времени, в течение которого стальной элемент (образец) не обменивается теплотой с окружающим пространством (адиабатический процесс). Для таких условий изменение температуры на каждом участке диаграммы (рис. 1) можно приближенно определить по формуле

$$\Delta t = \frac{\beta a_v}{c\rho}, \quad (6)$$

где β – коэффициент Тейлора–Квинни, являющийся постоянной величиной, лежащей в пределах от 0 до 1; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала.

Коэффициент Тейлора–Квинни имеет сложную природу [8, 9]. При расчетах по формуле (5) можно принимать коэффициент Тейлора–Квинни $\beta = 0,9$.

Образцы, методика их испытания и обработка результатов

Для экспериментальных испытаний на растяжение изготавливались плоские образцы по ГОСТ 1497 (рис. 2) двух типов. Первый образец имел толщину 20 мм, рабочую длину $l_0 = 140$ мм; материал – сталь 09Г2С. Второй образец: толщина 7,9 мм, рабочая длина $l_0 = 140$ мм, сталь – ВСтЗсп. Образцы подвергались растяжению на электронно-гидравлической серво-приводной универсальной испытательной машине WAW-1000 с микрокомпьютером 100Т. Скорость нагружения v находилась в пределах $3 \leq v \leq 9$ Н/(мм²·с). При испытании второй образец нагружался с перерывами по 5–7 с для контроля процесса трещинообразования в поверхностной окалине и развития полос Людерса–Чернова в металле.

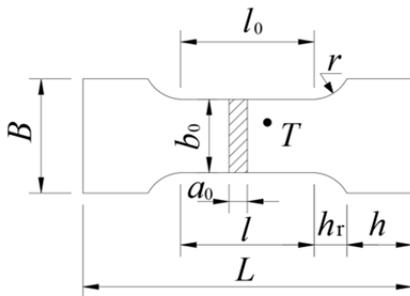


Рис. 2. Схема экспериментального образца

Fig. 2. Scheme of experimental sample

Первый образец нагружался без перерывов (непрерывно). Данные машинной диаграммы представлялись в численной форме. Пересчет в координатную систему σ – ϵ выполнялся в Excel. При растяжении образцы изменяли свое тепловое состояние. Это фиксировалось по изменению величин температуры в точке T

в средней части образца (рис. 2). Температура поверхности измерялась тепловизором testo 875i с температурной чувствительностью прибора меньше 0,05 °С при 30 °С.

Конечно-элементный расчет образцов при упруго-пластическом деформировании производился с использованием программного комплекса ANSYS. Прикладываемая к торцам образцов растягивающая сила $P_{кр}$ определялась как произведение площади опасного сечения на предел текучести материала. Развитие пластических деформаций в образцах наблюдалось при последовательном приложении к торцам образцов растягивающих сил, характеризуемых членами ряда: $0,5P_{кр}$, $0,8P_{кр}$, $P_{кр}$, $1,05P_{кр}$, $1,2P_{кр}$. Материал принимался с билинейным изотропным упрочнением. Тепловыделение при пластическом деформировании представлялось нелинейным процессом. При формировании расчетной модели с целью обеспечения лучшей сходимости расчетных циклов избегали конечных элементов сложной геометрической формы. При разбивке этапов расчета на подэтапы использовали специальную опцию Large Deflection. Доля накопленной энергии пластической деформации, затрачиваемой на теплообразование в образцах, определялась с использованием конечного элемента SOLID226. Определение поверхностной температуры при пластической деформации велось с использованием основных характеристик материала: коэффициента Тейлора–Квинни, удельной теплоемкости, теплопроводности.

Данные эксперимента и объемной конечно-элементной модели

Графики результатов натурных испытаний образцов приведены на рис. 3. Образец 2 был доведен до полного разрушения, первый образец – до образования шейки (рис. 4).

На образце 2 (рис. 4) выявлены следы полос скольжения, которые образовались в нем при приложении нагрузки на интервале a – c . Разрушение обоих образцов развивалось на ниспадающих ветвях, что видно на полученных графиках, и сопровождалось поэтапным развитием локальной неустойчивости пластического деформирования в форме «шейки».

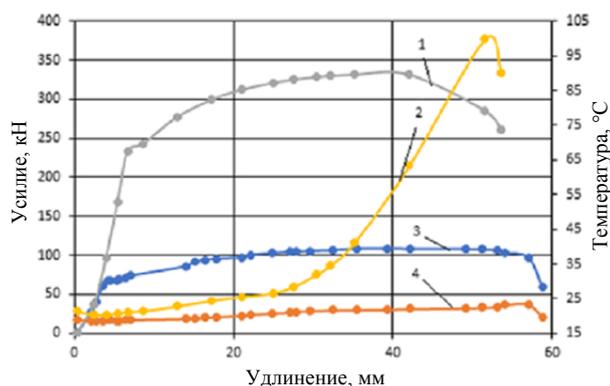


Рис. 3. Изменения температуры поверхности в точке T испытываемых образцов при растяжении, полученные в результате испытаний:
1, 3 – графики «усилие–удлинение» для образцов 1 и 2;
2, 4 – температуры поверхности в опасном сечении образцов 2 и 1

Fig. 3. Change in surface temperature at point T of tested samples during tension obtained as a result of tests:
1, 3 – “force–elongation” graphs for samples 1 and 2;
2, 4 – surface temperatures in dangerous section of samples 2 and 1



Рис. 4. Общий вид образцов 1 и 2 после испытания:
а – излом образца 1; б – шейка в образце 2

Fig. 4. General view of samples after testing:
а – fracture of the sample 1; б – neck in the sample 2

Фактически полученные графики экспериментальных кривых 1 и 3 (рис. 3) отображают основные четыре участка. Резкое нарастание теплообразования происходит на стадии зарождения и развития «шейки» в элементе. Температура поверхности первого образца (рис. 3, кривая 4) на этой стадии деформирования достигала 100 °С.

Данные расчета напряженно-деформированного и энергетического состояния экспериментальных образцов приведены на рис. 5–7. В процессе расчетного анализа подмечено, что фронт эквивалентных напряжений и пластиче-

ских деформаций при росте растягивающей силы от $0,8P_{кр}$ до $1,05P_{кр}$ для принятой модели образцов распространялся от середины образца к месту защемления захватов.

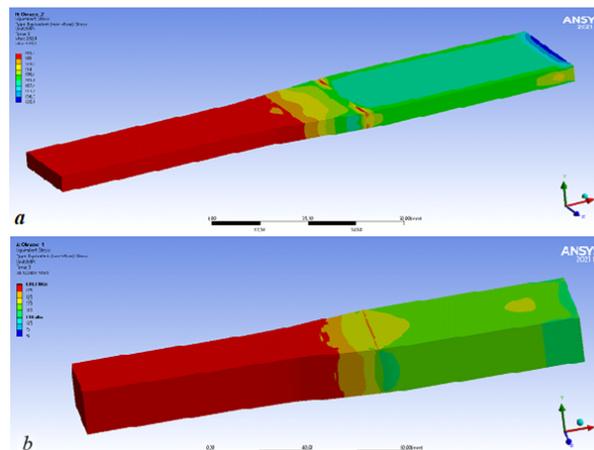


Рис. 5. Эквивалентные напряжения, по Мизесу, в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной $1,05P_{кр}$ (красный цвет – напряжения, превышающие σ_T)

Fig. 5. Equivalent von Mises stresses in sample 1 and sample 2 under loading with a force equal to $1.05R_{cr}$ (red color – stresses exceeding σ_T)

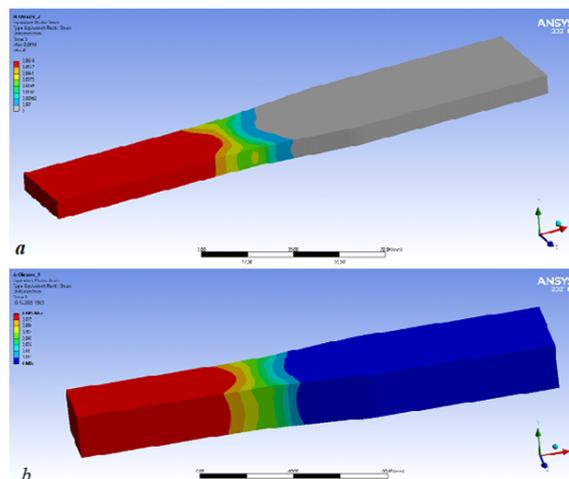


Рис. 6. Эквивалентные пластические деформации в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной $1,05P_{кр}$

Fig. 6. Equivalent plastic deformations in sample 1 and sample 2 under loading with a force equal to $1.05R_{cr}$

Наибольшее расчетное значение температуры поверхности образцов составляло: 29,5 °С (для образца 1) и 24,7 °С (для образца 2). Начальная температура образцов составляла 22 °С.

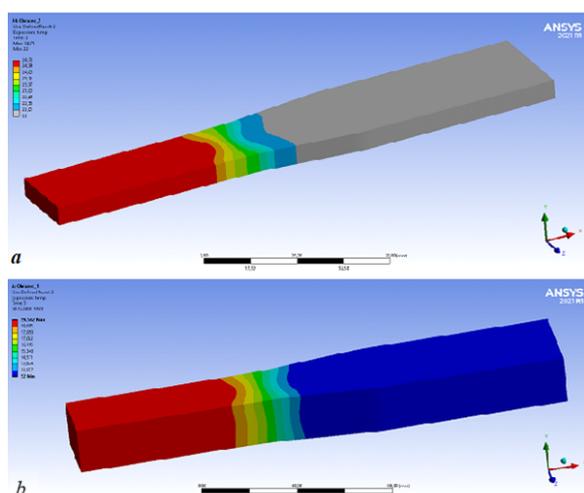


Рис. 7. Поверхностная температура в образце 1 и образце 2 при нагружении силой, равной $1,05P_{кр}$

Fig. 7. Surface temperature in sample 1 and sample 2 when loaded with a force equal to $1.05R_{cr}$

Обсуждение результатов

Данные рис. 3 показывают, что наибольший рост температуры образцов развивался при образовании и развитии шейки. Например, резкий скачок от 30 до 100 °С на температурной кривой 4 (рис. 3) образовался за 1/10 всего времени нагружения.

Расчетные величины изменения температур Δt , полученные по формулам (1)–(5) для стадий 1–4 деформирования образцов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменения температур Δt для стадий деформирования 1–4, полученные расчетом
Temperature changes Δt for deformation stages 1–4, obtained by calculation

Стадия деформирования образцов и Δt (рис. 1)	Нагрев материала образцов Δt , °С, при их деформировании на стадиях			
	1-я	2-я	3-я	4-я
Образец 1	1,04	0,92	25,5	10,2
Образец 2	2,34	1,32	24,5	6,75

Из сравнения данных таблицы с экспериментальными (рис. 3) вытекает, что температуры поверхности образцов 1 и 2 на каждой стадии существенно отличаются. Меньшие величины температур для образца 1, полученные при прямых измерениях, объясняются остыва-

нием металла в промежутках между ступенями его деформирования. Таких перерывов для образца 2 не происходило. Растяжение образца 2 велось непрерывно, вплоть до зарождения трещины скола в шейке. Фактически полученные значения температуры поверхности образца 2 на стадии 3 деформирования в 4 раза превышали расчетное. Такое расхождение объясняется как погрешностями расчета по формулам (1)–(5), так и пренебрежением долей теплообразования из-за твердотельных реакций в деформируемом металле [10].

ВЫВОДЫ

1. Температура нагрева металла деформируемого растяжением элемента в первом приближении может быть рассчитана по формулам (1)–(6). Более точные данные можно получить при автоматизированном расчете с использованием конечно-элементного анализа и соответствующих программных комплексов.

2. Экспериментальные величины температур поверхности при непрерывном квазистатическом деформировании существенно (до 5 раз) превышают их расчетные значения, что объясняется появлением значительных пластических деформаций.

3. Фиксирование температурных полей металлических элементов при их деформировании следует выполнять с использованием измерительных инфракрасных приборов дистанционно, с записью результатов в форме термофильмов.

ЛИТЕРАТУРА

- Nishina Yoshiaki. Various Measurement Technologies (Temperature/Stress/Fatigue/Crack) with Highly Precise Infrared Thermography and Their Applications / Nishina Yoshiaki, Imanishi Daisuke, Shibuya Kiyoshi // JFE Technical Report. 2012. No 17. P. 10–16.
- Мойсейчик, Е. А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин / Е. А. Мойсейчик. Минск: Ковчег, 2022. 200 с.
- Фам, Д. К. Кинетика накопления повреждений и критерий предельного состояния конструкционных материалов / Д. К. Фам, А. Н. Бабак, В. В. Коваль // Mechanics and Advanced Technologies. № 1 (82). 2018. С. 131–138. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127123>.

4. Мойсейчик, А. Е. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования / А. Е. Мойсейчик, Е. А. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. 2014. № 3. С. 3–19.
 5. Глушков, С. П. Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии / С. П. Глушков, Л. Ю. Соловьев, А. Л. Соловьев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (45). С. 63–71.
 6. Sakagami, T. Application of Infrared Thermography to Structural Integrity Evaluation of Steel Bridges / T. Sakagami, Y. Izumi, S. Kubo // Journal of Modern Optics. 2010. Vol. 57, No 18. P. 1738–1746. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289>.
 7. Яковлев, А. А. Удельная энергоёмкость и теплообразование в стальных образцах при квазистатическом растяжении / А. А. Яковлев, Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик // Теоретическая и прикладная механика: международ. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2023. Вып. 38. С. 112–117.
 8. Rosakis, P. A. A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals / P. A. Rosakis, A. I. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2000. Vol. 48, No 3. P. 581–607. [https://doi.org/10.1016/s0022-5096\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/s0022-5096(99)00048-4).
 9. Zaera, R. On the Taylor–Quinney Coefficient in Dynamically Phase Transforming Materials. Application 304 stainless steel / R. Zaera, J. A. Rodriguez-Martinez, D. Rittel // International Journal of Plasticity. 2012. Vol. 40. P. 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>.
 10. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д. Ю. Головин [и др.]; под общ. ред. Ю. И. Головина. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 214 с.
- Поступила 18.06.2024
 Подписана в печать 20.08.2024
 Опубликовано онлайн 30.09.2024
- REFERENCES
1. Nishina Yoshiaki, Imanishi Daisuke, Shibuya Kiyoshi (2012) Various Measurement Technologies (Temperature/Stress/Fatigue/Crack) with Highly Precise Infrared Thermography and Their Applications. *JFE Technical Report*, (17), 10–16.
 2. Moiseichik E. A. (2022) *Thermal Control of Materials, Steel Structures and Machines*. Minsk, Kovcheg Publ. 200 (in Russian).
 3. Pham D. K., Babak A. N., Koval V. V. (2018) Kinetics of Damage Accumulation and Limit State Criterion for Structural Materials. *Mechanics and Advanced Technologies*, (1), 131–138 (in Russian). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127123>.
 4. Moiseichik A. E., Moiseichik E. A. (2014) Fundamentals of Thermal Control of Load-Bearing Structures Using Deformation Heat Generation. *Nerazrushayushchiy Kontrol i Diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], (3), 3–19 (in Russian).
 5. Glushkov S. P., Soloviev L. Yu., Soloviev A. L. (2018) Experimental Assessment of the Durability of Welded Metal Bridge Spans Using the Infrared Thermography Method. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* [Siberian Transport University Bulletin], (2), 63–71 (in Russian).
 6. Sakagami T., Izumi Y., Kubo S. (2010) Application of Infrared Thermography to Structural Integrity Evaluation of Steel Bridges. *Journal of Modern Optics*, 57 (18), 1738–1746. <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.511289>.
 7. Yakovlev A. A., Moiseichik E. A., Moiseichik A. E. (2023) Specific Energy Intensity and Heat Generation in Steel Samples under Quasi-Static Tension. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.* [Theoretical and Applied Mechanics. International Scientific and Technical Collection]. Minsk, BNTU, Iss. 38, 112–117 (in Russian).
 8. Rosakis P. A., Rosakis A. I., Ravichandran G., Hodowany J. (2000) A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (3), 581–607. [https://doi.org/10.1016/s0022-5096\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/s0022-5096(99)00048-4).
 9. Zaera R., Rodriguez-Martinez A., Rittel D. (2012) On the Taylor–Quinney Coefficient in Dynamically Phase Transforming Materials. Application 304 stainless steel. *International Journal of Plasticity*, 40, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>.
 10. Golovin D. Yu., Tyurin A. I., Samodurov A. A., Divin A. G., Golovin Yu. I. (2019) *Dynamic Thermographic Methods of Non-Destructive Express Testing*. Moscow, TEKH-NOSFERA Publ. 214 (in Russian).
- Received: 18.06.2024
 Accepted: 20.08.2024
 Published online: 30.09.2024