

УДК 539.3+621.8.035

Е.А. МОЙСЕЙЧИК, д-р техн. наук, доц.
профессор кафедры «Мосты и тоннели»¹
E-mail: emoisseitchik@mail.ru

А.Е. МОЙСЕЙЧИК, канд. техн. наук
инженер²
E-mail: p0dcas10@gmail.com

А.А. ЯКОВЛЕВ
старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»¹
E-mail: mit_ftk@bntu.by

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила редакцию 24.07.2023.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КИНЕТИКИ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПО ИНФРАКРАСНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Целью настоящей статьи является проявление возможностей инфракрасной компьютерной термографии для диагностики развития пластических деформаций стальных изделий. Изложена методика проводимых экспериментальных исследований. Приведены и проанализированы результаты экспериментов. Обоснована возможность применения инфракрасной компьютерной термографии для исследований закономерностей зарождения, распространения и локализации пластической деформации в стальных элементах при их деформировании при комнатных температурах и после предварительного охлаждения. Показано, что для гладких образцов с удалением от захвата машины температура приповерхностных слоев отличается в большую сторону от соответствующей для срединных слоев. Превышение деформационной температуры поверхностных слоев над срединными зависит от стадии деформирования материала образца. В конце упругой стадии работы образца температуры отличаются на 1,7 °С, а в начале разрушения с образованием шейки превышение температур поверхностных слоев достигало 4,5 °С. В образцах с боковыми надрезами с удалением от захвата машины температура поверхности не изменялась в процессе нагружения. В сечениях, проходящих через зону отслоения окалины вблизи надрезов, температура поверхности в средней части образца выше на 3,0–3,5 °С, чем в крайней. Максимальная температура металла поверхности при деформировании достигала 70 °С. Обнаружено, что примыкающие к надрезу участки образца в процессе деформирования теряют устойчивость положения, проявляющуюся в изменении первоначального положения на деформированное. При этом устойчивость терял примыкающий к надрезу металл в форме призмы с треугольным основанием и высотой, равной толщине листа, под действием нормальных и касательных напряжений. Металл в объеме призмы практически не деформировался. Температура основания призмы незначительно возросла только после зарождения трещины в надрезе.

Ключевые слова: пластические деформации, инфракрасное излучение, образцы, температура, компьютерная термография

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-78-87>

Введение. Работоспособность стальных элементов, содержащих конструктивно-технологические дефекты, существенно зависит от кинетики зарождения, развития и локализации пластических деформаций, от поведения материала при больших упругопластических деформациях [1–3]. Деформирование с образованием локализованных пластических сдвигов в форме мезополос начинается на мезомасштабном уровне [4]. На макромасштаб-

ном уровне локализованное пластическое течение представляет собой сложные системы взаимно коррелированных сдвигов [4]. Деформируемый металл в зоне полос сдвига и течения находится в активированном состоянии и является источником инфракрасного излучения [5–14]. Этот факт не учитывается в большинстве современных методов исследования пластических деформаций и развития разрушения металлических изделий [1, 2, 6].

Традиционно для исследования локальных неоднородностей пластических деформаций изделий применяются оптико-геометрические (метод делительных и муаровых сеток), интерференционно-оптические и поляризационно-оптические методы [5, 6]. Этим методам наряду с достоинствами (например, измерения деформаций по всему полю зрения) присущи и недостатки (трудоемкость эксперимента, использование сложной аппаратуры, ограниченные возможности в условиях производства и эксплуатации). Поэтому разрабатываются методы исследования пластического деформирования, основанные на излучении с исследуемой поверхности [15]. Перспективным методом выявления кинетики развития пластических деформаций в изделиях, в т. ч. содержащих конструктивно-технологические дефекты, является пассивный метод, основанный на использовании тепла, выделяющегося при деформировании, и современных приборов его визуализации. Пассивные тепловые методы успешно применяются в энергетике, строительстве, металлургии для исследования объектов, выделяющих технологическое тепло [5–8]. Перспективным является применение этих методов для исследования процессов деформирования и разрушения металлических конструкций и их элементов. Немногочисленные работы этого направления и их приложения проанализированы в монографии [8].

Так, проблема раннего выявления трещин и контроля за кинетикой их развития актуальна для тяжело нагруженных карьерных самосвалов и другой техники [8, 16]. В зонах концентраторов напряжений в стальных несущих конструкциях (рамах, балках) такой техники зарождаются усталостные трещины, при критической длине которых разрушение развивается по механизму хрупкого излома [16]. При толщинах элементов несущих конструкций в 20–25 мм и более радиус пластической зоны в вершине трещин (усталостных и хрупких) ничтожно мал в сравнении с толщиной элемента. Соответственно, производимое пластической зоной деформационное тепло рассеивается в большом объеме прилегающего к вершине трещины холодного металла. Также ничтожно малым будет и ожидаемое изменение температурного поля поверхности в зоне расположения вершины трещины. При низких температурах эксплуатации деформационный нагрев и соответствующее инфракрасное излучение с контролируемой поверхности будет еще меньше. Это потребует высокой чувствительности приборов, фиксирующих инфракрасное излучение.

Целью настоящей статьи является применение теплового метода, основанного на инфракрасном излучении с исследуемой поверхности деформируемых растяжением изделий для визуализации процесса зарождения и развития пластических деформаций.

Изделия, методы исследований. Для исследований на растяжение принимаем пропорциональные образцы без конструктивных дефектов и с ними, в которых растягивающие напряжения действуют в зонах с концентраторами напряжений. Размеры экспериментальных образцов принимаем с учетом возможностей испытательных машин и толщины листового проката 20 мм. Материал образцов — листовая сталь 09Г2С (ГОСТ 27772-2015). Образцы испытываем на растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Испытания статические, скорость деформирования — не более 5 мм/мин. Образцы испытывали в температурных условиях лаборатории. Часть образцов предварительно охлаждали до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в холодном состоянии устанавливали в испытательную машину. Образцы охлаждались в стандартной холодильной камере. Доставка образцов из холодильной камеры выполнялась в транспортном контейнере с теплоизолированными стенками, днищем, крышкой. Небольшой нагрев образца за время переноски его от холодильной камеры и установки в захваты испытательной машины компенсировался его соответствующим переохлаждением в холодильной камере. Изменение температуры в контейнере при переносе контролировалось измерителем температуры.

Приборы, оборудование, методика измерений. Силонагружение производили в гидравлической универсальной испытательной машине WAW-1000 (рисунок 1). В качестве прибора, регистрирующего инфракрасное излучение испытываемого материала, использовался компьютерный портативный термограф IRTIS-2000CH (см. рисунок 1), который имеет следующие технические характеристики:

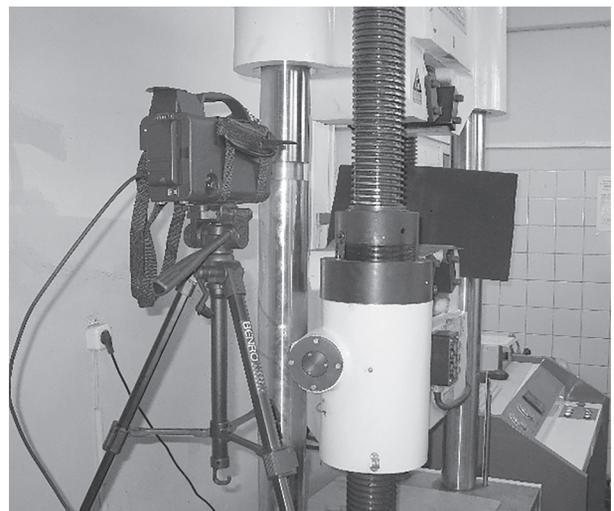


Рисунок 1 — Общий вид испытательной установки в составе компьютерного портативного термографа IRTIS-2000CH и гидравлической универсальной испытательной машины WAW-1000
Figure 1 — General view of the test installation consisting of computer portable thermograph IRTIS-2000CH and hydraulic universal testing machine WAW-1000

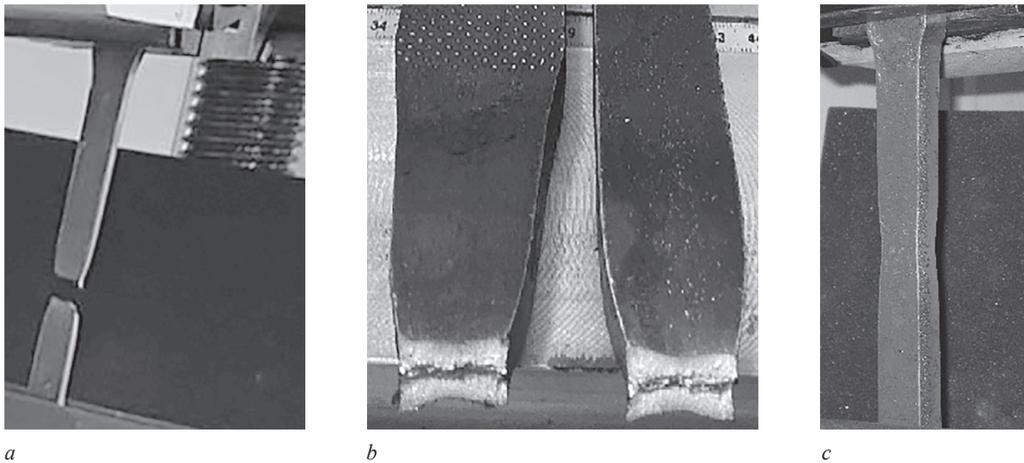


Рисунок 2 — Виды пропорциональных плоских образцов после разрушения:

a — образец 1 толщиной 8 мм; *b* — образец 2 толщиной 20 мм; *c* — шейка в образце 2

Figure 2 — Views of proportional flat specimens after fracture: *a* — 8 mm thick specimen 1; *b* — 20 mm thick specimen 2; *c* — neck in specimen 2

- чувствительность к перепаду температур на уровне $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- диапазон измерений — от -40 до $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- диапазон рабочих температур — от -20 до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- погрешность измерения абсолютных температур по АЧТ — $\pm 1\%$ от изм. диапазона;
- число элементов разложения по строке — 320;
- число строк в кадре — 240;
- время формирования кадра (три скорости сканирования) — $\leq 0,8; 1,6; 3,2\text{ с}$;
- охлаждение камеры — жидкий азот.

Измерение температурного поля исследуемых поверхностей проводилось в виде термофильма, который начинался за 15 с до начала деформирования образца. Запись термофильма велась параллельно со съемкой в видимом спектре и завершалась через 10–15 с после остановки испытательной машины. Одновременно со съемкой

термо- и видеофильмов в характерных точках контролируемой поверхности температура поверхности фиксировалась термопарой.

Экспериментальные данные и их обсуждение. Пластина без конструктивных дефектов, надрезов. Вид образцов после разрушения показан на рисунке 2.

На рисунках 3, 4 приведены термограммы для 10-го (конец упругой стадии работы материала) и 132-го (стадия начала разрушения — образование шейки) кадров. Сопоставление данных на этих рисунках позволяет видеть, что температура приповерхностных слоев металла отличается от температуры металла, расположенного в средней части образца. Из рисунка 4 *b* следует, что в сечении, ближайшем к захвату испытательной машины (линия 1 на рисунках 4 *a*, *b*), распределение деформационной температуры по ширине об-

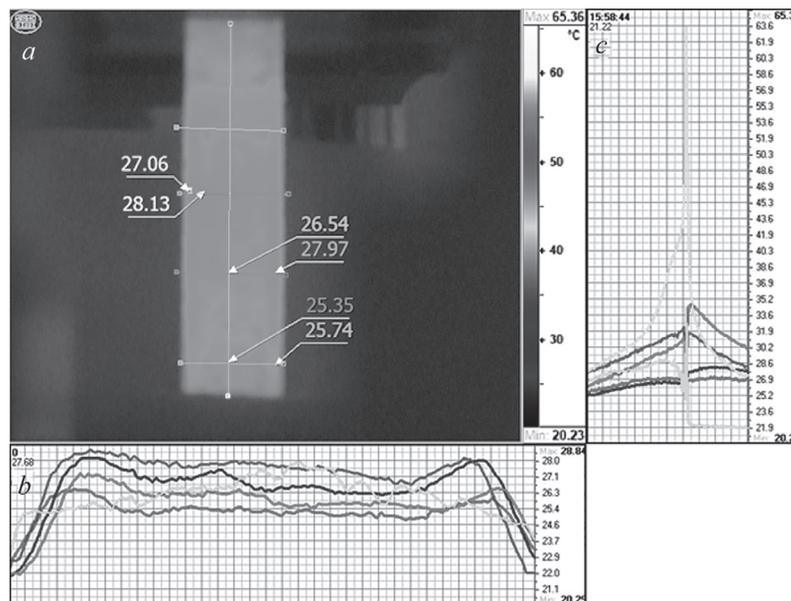


Рисунок 3 — Термограмма (кадр 10) деформирования образца 2 (*a*) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (*b*) и точкам за время испытания образца (*c*)

Figure 3 — Thermogram (frame 10) of specimen 2 deformation (*a*) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (*b*) and points during the time of specimen testing (*c*)

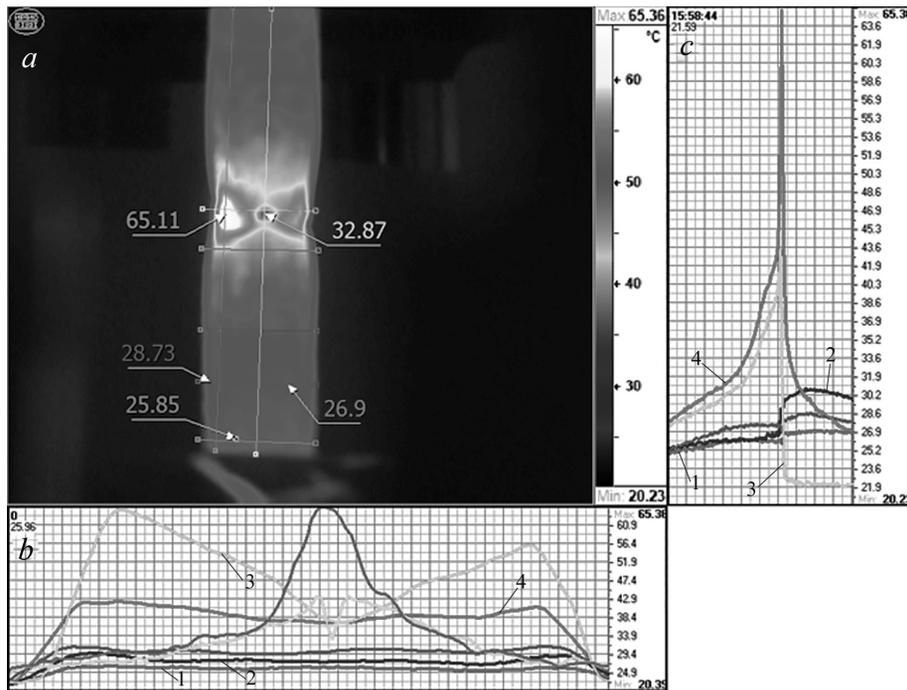


Рисунок 4 — Термограмма (кадр 132) деформирования образца 2 при образовании шейки (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (b) и точкам за время испытания образца (с)
 Figure 4 — Thermogram (frame 132) of specimen 2 deformation during neck formation (a) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (b) and points during specimen testing (c)

разца одинаково. С удалением от захвата машины (линии 2, 3 и 4 на рисунках 4 а, b) температура приповерхностных слоев отличается в большую сторону от соответствующей для срединных слоев. Превышение деформационной температуры поверхностных слоев над срединными зависит от стадии деформирования материала образца. В конце упругой стадии работы образца температуры отличаются на 1,7 °С, а в начале разрушения с образованием шейки превышение температур поверхностных слоев достигало 4,5 °С. В стадии образования шейки (см. рисунок 2) компьютерное термографирование позволило выявить полость в средней части опасного сечения (точка с температурой 32,87 °С), не видимую визуально. Данные термограмм 10 и 132 и соответствующие графики изменения температур поверхности показали, что зарождение разрушения в опасном сечении образца происходило в зоне проявления максимальной температуры поверхности. Это подтверждалось и другими термограммами фильма.

Объяснить неодинаковый деформационный нагрев можно, исходя из различий в деформированном состоянии приповерхностных и внутренних слоев материала растянутого образца. Материал приповерхностных слоев имеет меньшее сопротивление деформированию. Напряженное состояние тонкого приповерхностного слоя в первом приближении можно характеризовать плоским напряженным состоянием. Материал средней части толстого (16–40 мм) образца работает в условиях, близких к плоскому деформированному состоянию, и оказывает большее сопротив-

ление сдвиговым деформациям. Так как нагрев материала происходит за счет теплообразования в полосах сдвигов [5], то эту особенность деформирования приповерхностных слоев материала и проявляет их большая деформационная температура.

Взаимосвязь между машинной диаграммой образцов 1 толщиной 8 и 20 мм и соответствующими максимальными деформационными температурами гладких образцов (обозначены как max) показана на рисунке 5.

Растяжение пластин с боковыми надрезами. Такие пластины толщиной 20 мм и данные их термографии при растяжении показаны на рисунках 6–15. Надрезы выполнялись как на меньшей

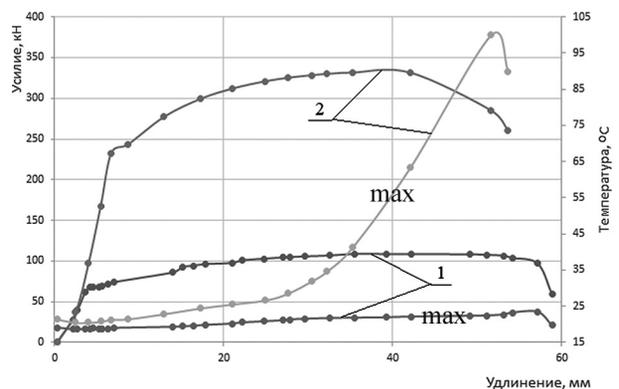
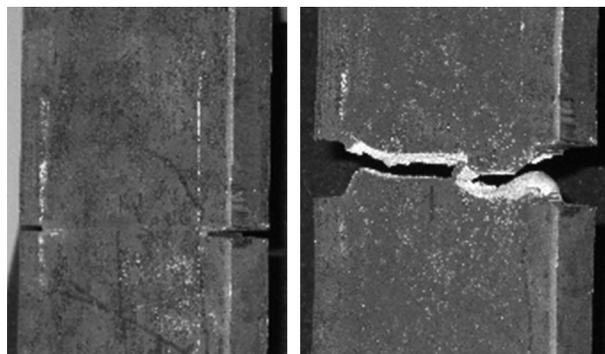


Рисунок 5 — Машинные диаграммы для пропорциональных образцов толщиной 8 (1) и 20 мм (2) и изменение соответствующих максимальных деформационных температур (max)
 Figure 5 — Machine diagrams for proportional specimens with thicknesses of 8 (1) and 20 mm (2) and the variation of the corresponding maximum strain temperatures (max)

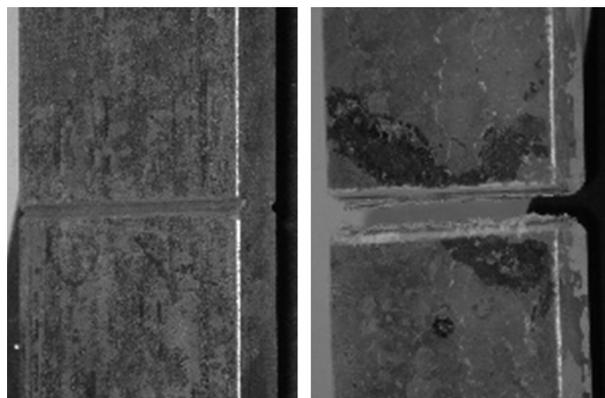
стороне пластины, так и на большей (см. рисунок 6).

Пластина А. Вид деформированного образца и термограмма с графиками для образца с надрезом на меньшей стороне, вид излома приведены на рисунках 7–9.

Термограмма кадра 48 для пластины с надрезами на меньшей стороне (см. рисунок 8) проявляет несколько иную схему нагрева металла. Так, при последовательном движении линии от захватов к опасному сечению увеличение температуры наблюдается в средних слоях образца (на 6–7 °С выше, чем в крайних). Частично это можно объяснить особенностями деформирования металла боковой кромки, примыкающей к надрезу. На рисунке 7 *a* показан деформируемый образец с отслоившейся окалиной на участках, где произошли пластические деформации. Наблюдение поверхности при возрастании силы P показало, что отслоение началось у дна надреза и развивалось в областях, выделенных цифрой 1. При этом средняя часть образца, выделенная цифрой 2, сохраняла на поверхности окалину до момента зарождения трещины в дне надреза, т. е. находилась в упругом состоянии. Пластические деформации развивались в средней части образца вне области 2.

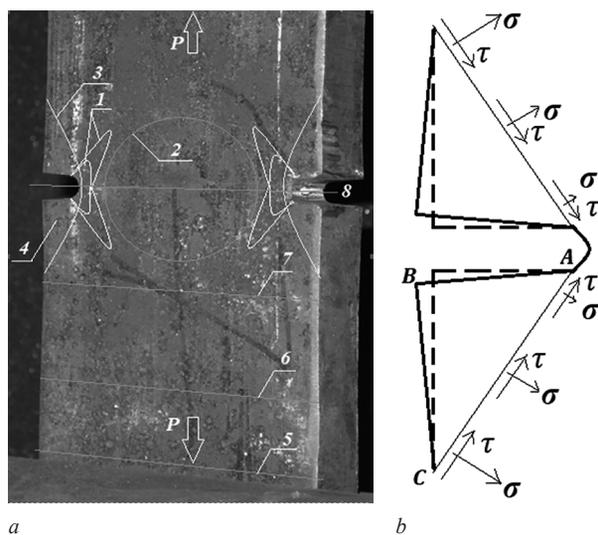


a



b

Рисунок 6 — Вид пластин с боковыми симметричными надрезами (начальный вид / вид после разрушения): *a* — пластина с надрезами на меньшей (20 мм) стороне глубиной 18 мм; *b* — пластина с надрезами на большей (100 мм) стороне глубиной 8 мм
Figure 6 — View of plates with lateral symmetrical notches (initial view / view after fracture): *a* — plate with notches on the smaller (20 mm) side 18 mm deep; *b* — plate with notches on the larger (100 mm) side 8 mm deep



a

b

Рисунок 7 — Вид деформируемого образца с надрезами на меньшей стороне (*a*) и поясняющие схемы (*b*)
Figure 7 — View of the deformed specimen with notches on the smaller side (*a*) and explanatory diagrams (*b*)

Описанную последовательность деформирования образца подтверждает и анализ кинетики температурного поля поверхности в процессе нагружения (см. рисунок 8 *b, c*). Последовательные термо- и видеок кадры показали монотонное возрастание до максимума температуры у дна надреза, сопровождающееся первым отслоением окалины. Процесс изменения температуры поверхности в точке «38,13» (точка поверхности с температурой поверхности 38,13 °С в момент фиксации термокадра) за время нагружения образца до разрушения показан на графике рисунка 8 *c*. Изменение температуры по сечениям поверхности 5–8 (см. рисунки 8 *a, b*) показывает, что в сечениях 5, 6 температура поверхности не изменялась в процессе нагружения. В сечении 7, проходящем через зону отслоения окалины, температура поверхности в средней части образца выше на 3,0–3,5 °С, чем в крайней. Максимальная температура металла поверхности достигала 70 °С.

На рисунке 7 *a* можно заметить, что примыкающие к надрезу участки образца в процессе деформирования теряют устойчивость положения, которое выражается в изменении первоначального положения (см. рисунок 7 *b*, штриховые линии) на новое (см. рисунок 7 *b*, сплошные линии), т. е. призма с основанием ABC и высотой, равной толщине листа, под действием напряжений σ и τ потеряла устойчивость. Металл в объеме призмы практически не деформировался. Температура ее основания начала незначительно возрастать только после зарождения трещины в надрезе.

Излом такой толстой пластины квазихрупкий (см. рисунок 9) с началом зарождения трещины в зоне пластических деформаций у основания надреза.

Пластина Б (испытание при комнатной температуре). Излом пластины типа Б — хрупкий

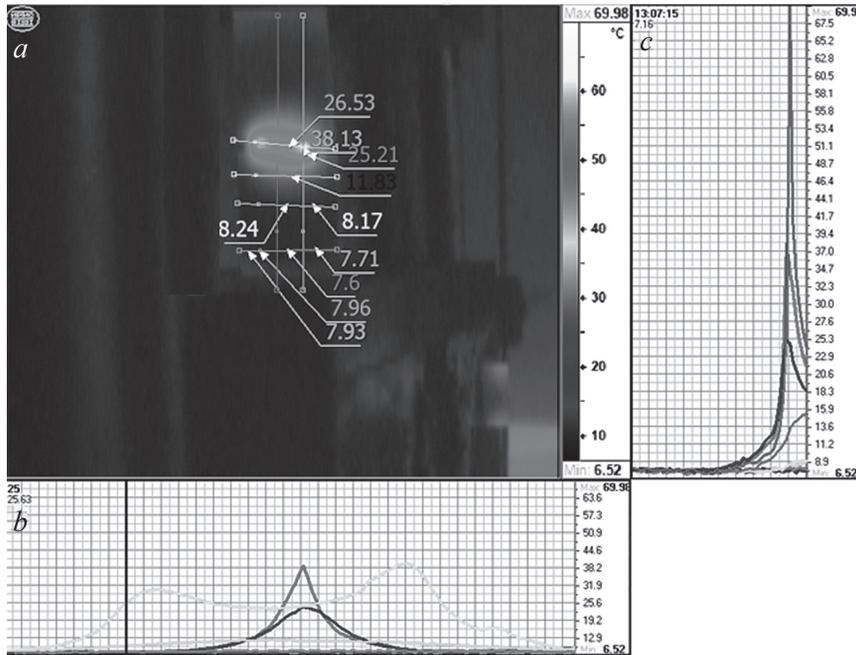


Рисунок 8 — Термограмма (кадр 48) деформирования образца при образовании шейки (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (b) и точкам за время испытания образца (c)
 Figure 8 — Thermogram (frame 48) of specimen deformation during neck formation (a) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (b) and points during specimen testing (c)

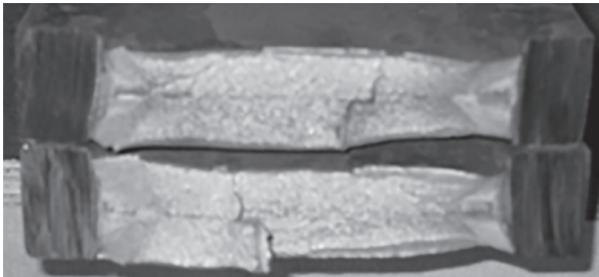


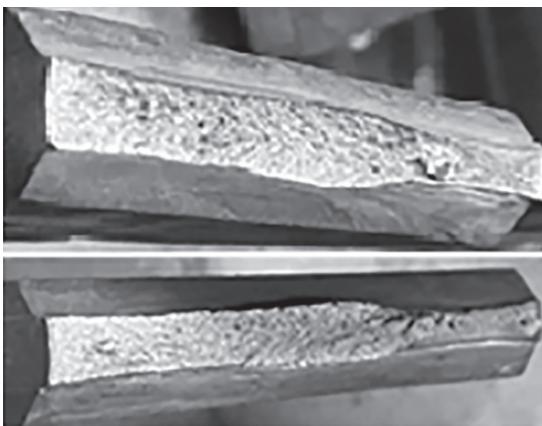
Рисунок 9 — Вид излома образца типа А
 Figure 9 — Fracture view of type A specimen

(см. рисунок 10). Температурное поле поверхности образца типа Б за секунду до излома представлено на рисунке 11. Сопоставление термограмм

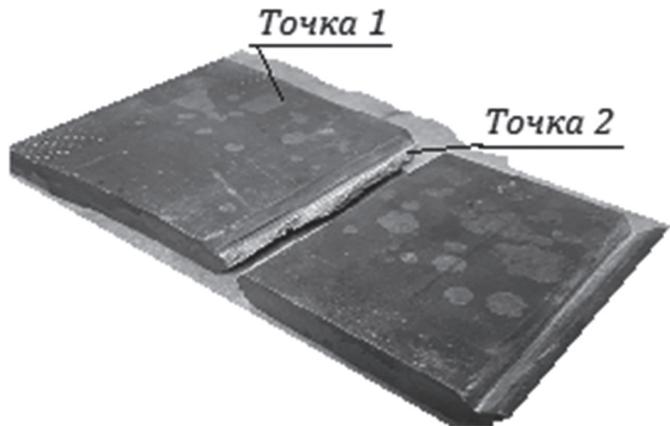
для образцов двух типов с одинаковой скоростью деформирования показывает, что температура поверхности образца при хрупком изломе значительно ниже, чем при вязком. Это объясняется большой скоростью движения магистральной трещины (сопоставимой со скоростью звука в стали) в практически упругом материале. Пластические деформации даже в тонком поверхностном слое в основании надреза боковой поверхности образца не успевают развиваться.

Изменение температуры образца в выделенных точках 1 и 2 (см. рисунок 10 б) при деформировании образца показано на рисунке 12.

Пластина Б (испытание при низкой температуре). Начальная температура образца после уста-



a



b

Рисунок 10 — Вид излома образца типа Б: а — от квазихрупкого у точки 2 к хрупкому с шевронным рисунком; б — точки поверхности с различными максимальными температурами
 Figure 10 — Fracture view of type B specimen: a — from quasi-brittle at point 2 to brittle with a chevron pattern; b — surface points with various maximum temperatures

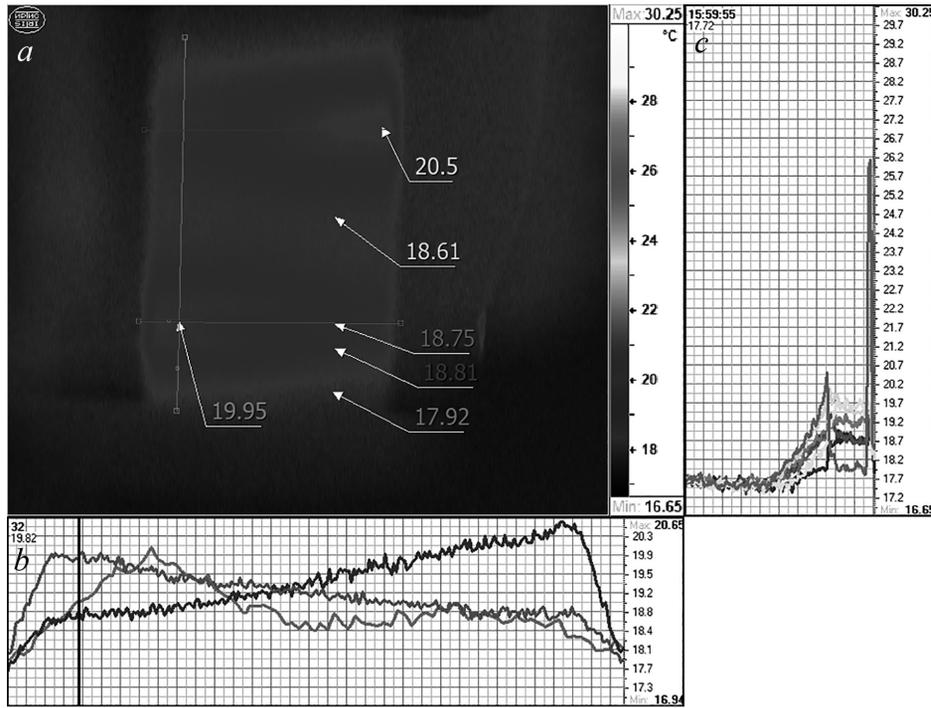


Рисунок 11 — Термограмма (кадр 87) деформирования образца типа Б за секунду до излома (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (b) и точкам за время испытания образца (с)
 Figure 11 — Thermogram (frame 87) of type B specimen deformation one second before fracture (a) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (b) and points during the specimen testing time (c)

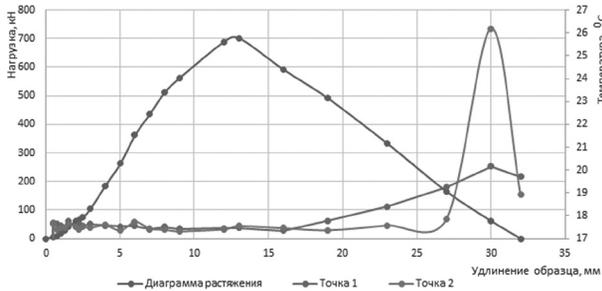


Рисунок 12 — Взаимосвязь максимальных температур в точках 1 и 2 с машинной диаграммой
 Figure 12 — Relationship of maximum temperature at points 1 and 2 with the machine diagram

новки в захваты испытательной машины равнялась $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рисунок 13). Излом пластины типа Б — хрупкий (см. рисунок 13). Распределение температур поверхности представлено на рисунке 14.

Рисунки 14 и 15 показывают, что массивные захваты, имеющие комнатную температуру, достаточно быстро передают тепло примыкающим охлажденным частям образца, что привело к повышению его температуры на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ примерно за 4,5 минуты. В очаге зарождения трещины температура металла поднималась от $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ до максимального значения $+11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заключение. 1. В статье экспериментально обоснована возможность применения инфракрас-

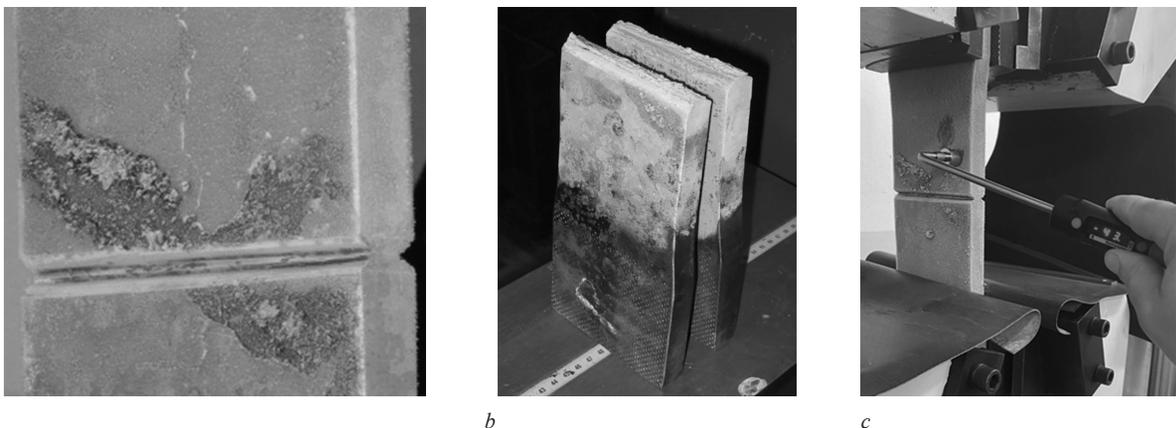


Рисунок 13 — Вид предварительно охлажденного образца типа Б с одним парным надрезом до и после нагружения: а — вид охлажденного образца с инеем на поверхности; б — образец после излома; в — контрольное измерение температуры поверхности образца

Figure 13 — View of type B pre-cooled specimen with one paired notch before and after loading: a — view of the cooled specimen with frost on the surface; b — post-fracture specimen; c — reference measurement of the specimen surface temperature

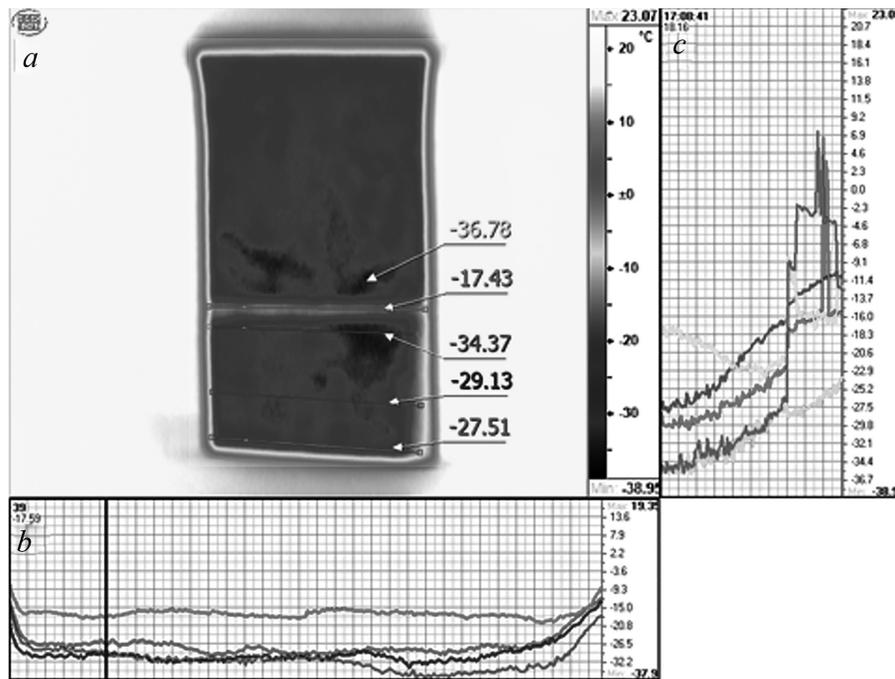


Рисунок 14 — Термограмма (кадр 1 из 128) деформирования охлажденного образца типа Б (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (b) и точкам за время испытания образца (с)
 Figure 14 — Thermogram (frame 1 of 128) of deformation of the pre-cooled type B specimen (a) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (b) and points during the specimen testing (c)

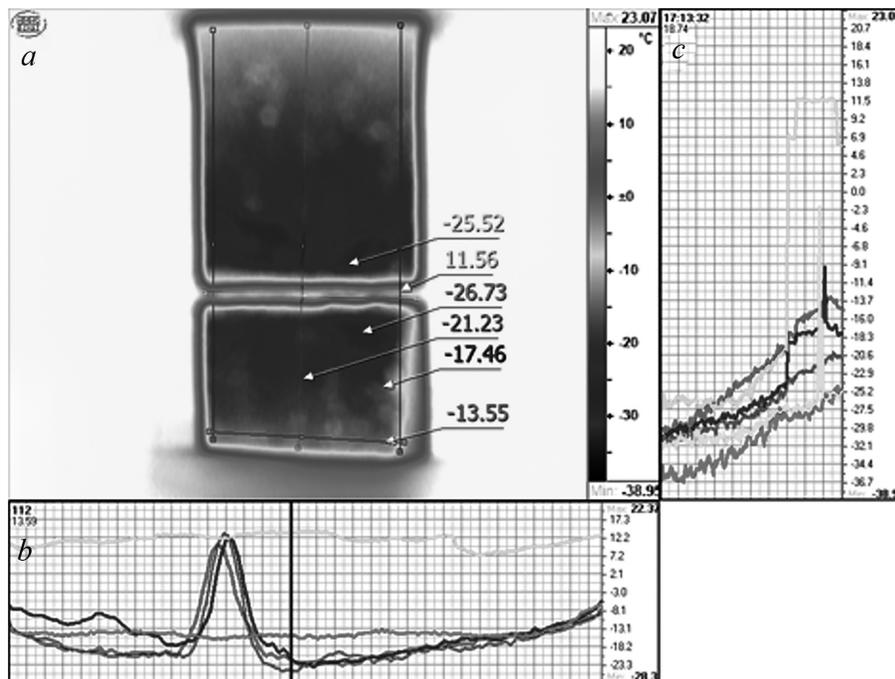


Рисунок 15 — Термограмма (кадр 123 из 128) деформирования охлажденного образца типа Б (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (b) и точкам за время испытания образца (с)
 Figure 15 — Thermogram (frame 123 of 128) of deformation of the pre-cooled type B specimen (a) and diagrams of surface temperature changes along selected lines (b) and points during the specimen testing (c)

ной компьютерной термографии для исследований закономерностей зарождения, распространения и локализации пластической деформации в стальных элементах при их деформировании при комнатных температурах и после предварительного охлаждения.

2. Для гладких образцов с удалением от захвата машины температура приповерхностных слоев от-

личается в большую сторону от соответствующей для срединных слоев. Превышение деформационной температуры поверхностных слоев над срединными зависит от стадии деформирования материала образца. В конце упругой стадии работы образца температуры отличаются на 1,7 °С, а в начале разрушения с образованием шейки превышение температур поверхностных слоев достигало 4,5 °С.

3. В образцах с боковыми надрезами с удалением от захвата машины температура поверхности не изменялась в процессе нагружения. В сечениях, проходящих через зону отслоения окалины вблизи надрезов, температура поверхности в средней части образца выше на 3,0–3,5 °С, чем в крайней. Максимальная температура металла поверхности при деформировании достигала 70 °С.

4. Примыкающие к надрезу участки образца в процессе деформирования теряют устойчивость положения, проявившуюся в изменении первоначального положения на деформированное. При этом примыкающий к надрезу металл в форме призмы с треугольным основанием и высотой, равной толщине листа, под действием нормальных и касательных напряжений терял устойчивость. Металл в объеме призмы практически не деформировался. Температура основания призмы начала незначительно возрастать только после зарождения трещины в надрезе.

Список литературы

1. Современные задачи механики разрушения и механики катастроф / Н.А. Махугов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017. — Т. 83, № 10. — С. 55–64. — DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2017-83-10-55-64>.
2. Makhutov, N. Failure and accident risks of technical systems in Siberia and the Arctic // N. Makhutov, V. Moskvichev, U. Postnikova // RT&A. — 2022. — Vol. 17, Special Iss. № 3(66). — Pp. 49–58. — DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-49-58>.
3. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В.В. Москвичев [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с.
4. Зуев, Л.Б. Автоволокная пластичность. Локализация и коллективные моды / Л.Б. Зуев. — М.: Физматлит, 2019. — 208 с.
5. Bøving, K.G. NDE handbook: non-destructive examination methods for condition monitoring / K.G. Bøving (Editor). — Butterworth-Heinemann, 2014. — 428 p. — DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06279-2>.
6. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д.Ю. Головин [и др.]; под общ. ред. Ю.И. Головина. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 214 с.
7. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. — 2-е изд. — М.: Спектр, 2013. — 575 с.
8. Мойсейчик, Е.А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин: монография / Е.А. Мойсейчик. — Минск: Ковчег, 2022. — 200 с.
9. Сокоиков, М.А. Исследование локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении методом инфракрасной термографии // М.А. Сокоиков // Вестн. ПНИПУ. Физика. — 2018. — № 2(40). — С. 52–57. — DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2018-2-52-57>.
10. Исследование эволюции источников тепла в процессе упругопластического деформирования титанового сплава ОТ4-0 на основе контактных и бесконтактных измерений / А.Ю. Изюмова [и др.] // Вестн. ПНИПУ. Механика. — 2016. — № 1. — С. 68–81. — DOI: <https://doi.org/10.15593/pern.mech/2016.1.05>.
11. Костина, А.А. Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов / А.А. Костина, Ю.В. Баяндин, О.А. Плехов // Физическая мезомеханика. — 2014. — Т. 17, № 1. — С. 43–49.
12. Мойсейчик, Е.А. Моделирование работы и термография растянутых сварных соединений стальных конструкций с паяными накладками / Е.А. Мойсейчик, С.Д. Шафрай // Вестн. гражданских инженеров. — 2014. — № 6(47). — С. 58–63.
13. Moysesychik, E.A. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects / E.A. Moysesychik, V.P. Vavilov // International Journal of Damage Mechanics. — 2018. — Vol. 27, iss. 6. — Pp. 950–960. — DOI: <https://doi.org/10.1177/1056789517715087>.
14. Olfieruk, W. Determination of the energy storage rate distribution in the area of strain localization using infrared and visible imaging / W. Olfieruk, M. Maj, K. Zembrzycki // Experimental Mechanics. — 2015. — Vol. 55, iss. 4. — Pp. 753–760. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9819-1>.
15. Пантелеев, К.В. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. — 2015. — № 1(10). — С. 56–63.
16. Доронин, С.В. Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами / С.В. Доронин, Т.В. Донцова // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. — 2012. — Т. 5, № 6. — С. 703–714.

MOYSEYCHIK Eugene A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.
Professor of the Department “Bridges and Tunnels”¹
E-mail: emoisseitchik@mail.ru

MOYSEYCHIK Alexander E., Ph. D. in Eng.
Engineer²
E-mail: p0dcas10@gmail.com

YAKOVLEV Alexander A.
Senior Lecturer of the Department “Bridges and Tunnels”¹
E-mail: mit_ftk@bntu.by

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Republic of Belarus

Received 24 July 2023.

VISUALIZATION OF KINETICS OF PLASTIC DEFORMATIONS IN STEEL PRODUCTS BY INFRARED RADIATION

The purpose of this article is to identify the possibility of infrared computer thermography for diagnosing the development of plastic deformations of steel products. Methods of conducted experimental studies were published. The results of experiments are presented and analyzed. The possibility of application of infra-

red computer thermography for research of regularities of origin, propagation and localization of plastic deformation in steel elements during their deformation at room temperatures and after preliminary cooling is substantiated. It is shown that for smooth specimens with distance from the machine grip, the temperature of near-surface layers differs to a greater extent from the corresponding temperature for the mid-surface layers. The excess of the deformation temperature of the surface layers over the mid-surface layers depends on the stage of deformation of the sample material. At the end of the elastic stage of the specimen, the temperatures differ by 1.7 °C, and at the beginning of fracture with the formation of the neck, the excess of surface layer temperatures reached 4.5 °C. In specimens with lateral notches with a distance from the machine grip, the surface temperature did not change during loading. In the sections passing through the zone of scale delamination near the notches, the surface temperature in the middle part of the specimen is higher by 3.0–3.5 °C than in the vicinity. The maximum temperature of the metal surface during deformation reached 70 °C. It was found that the sections of the specimen adjacent to the notch in the process of deformation lose position stability, manifested in the change of the initial position to the deformed one. At the same time, the metal adjacent to the notch in the form of a prism with a triangular base and a height equal to the sheet thickness lost stability under the action of normal and tangential stresses. The metal in the prism volume was practically not deformed. The prism base temperature increased slightly only after the initiation of the notch crack.

Keywords: plastic deformations, infrared radiation, specimens, temperature, computer thermography

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-78-87>

References

- Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Morozov E.M., Goldstein R.V. Sovremennye zadachi mekhaniki razrusheniya i mekhaniki katastrof [Unification of computation and experimental methods of testing for crack resistance: development of the fracture mechanics and new goals]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83, no. 10, pp. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2017-83-10-55-64> (in Russ.).
- Makhutov N., Moskvichev V., Postnikova U. Failure and accident risks of technical systems in Siberia and the Arctic. *RT&A*, 2022, vol. 17, Special Issue no. 3(66), pp. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-49-58>.
- Moskvichev V.V., et al. *Prikladnye zadachi konstruktivnoy prochnosti i mekhaniki razrusheniya tekhnicheskikh sistem* [Applied problems of structural strength and fracture mechanics of technical systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2021. 796 p. (in Russ.).
- Zuev L.B. *Avtovolnovaya plastichnost. Lokalizatsiya i kolektivnye mody* [Autowave plasticity. Localization and collective modes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2019. 208 p. (in Russ.).
- Bøving K.G. *NDE handbook: non-destructive examination methods for condition monitoring*. Butterworth-Heinemann, 2014. 428 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06279-2>.
- Golovin D.Yu., et al. *Dinamicheskie termograficheskie metody nerazrushayushchego ekspress-kontrolya* [Dynamic thermographic methods of non-destructive express testing]. Moscow, TEKHNOSEFA Publ., 2019. 214 p. (in Russ.).
- Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, Spektr Publ., 2013. 575 p. (in Russ.).
- Moyseychik E.A. *Teplovoy kontrol materialov, stalnykh konstruktivnykh i mashin* [Thermal control of materials, steel structures and machines]. Minsk, Kovcheg Publ., 2022. 200 p. (in Russ.).
- Sokovikov M.A. Issledovanie lokalizatsii plasticheskoy deformatsii i razrusheniya pri dinamicheskom nagruzhении методом infrakrasnoy termografii [The study of plastic strain and fracture localization under dynamic loading using infrared thermography technique]. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 2(40), pp. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2018-2-52-57> (in Russ.).
- Iziumova A.Y., Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Plekhov O.A., Venkatraman B. Issledovanie evolyutsii istochnikov tepla v protsesse uprugoplasticheskogo deformirovaniya titanovogo splava OT4-0 na osnove kontaktnykh i beskontaktnykh izmereniy [Study of heat source evolution during elastic-plastic deformation of titanium alloy Ti-0.8Al-0.8Mn based on contact and non-contact measurements]. *PNRPU mechanics bulletin*, 2016, no. 1, pp. 68–81. DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.05> (in Russ.).
- Kostina A.A., Bayandin Yu.V., Plekhov O.A. Modelirovanie protsessy nakopleniya i dissipatsii energii pri plasticheskom deformirovanii metallov [Model of energy accumulation and dissipation in plastically deformation metals]. *Physical meso-mechanics*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 43–49 (in Russ.).
- Moyseychik E.A., Shafraiy S.D. Modelirovanie raboty i termografiya rastyanutykh svarnykh soedineniy stalnykh konstruktivnykh s parnymi nakladkami [Simulation of performance and thermography of tensioned welded joints of steel structures with paired straps]. *Bulletin of civil engineers*, 2014, no. 6(47), pp. 58–63 (in Russ.).
- Moyseychik E.A., Vavilov V.P. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects. *International journal of damage mechanics*, 2018, vol. 27, iss. 6, pp. 950–960. DOI: <https://doi.org/10.1177/1056789517715087>.
- Oliferuk W., Maj M., Zembrzycki K. Determination of the energy storage rate distribution in the area of strain localization using infrared and visible imaging. *Experimental mechanics*, 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 753–760. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9819-1>.
- Panteleyev K.V., Svistun A.I., Zharin A.L. Diagnostika lokalnykh izmeneniy plasticheskoy deformatsii po rabote vykhoda elektrona [Methods for local changes in the plastic deformation diagnostics on the work function]. *Devices and methods of measurements*, 2015, no. 1(10), pp. 56–63 (in Russ.).
- Doronin S.V., Dontsova T.V. Otsenka i regulirovanie svoystv ram karernykh samosvalov s treschinopodobnymi defektami [Assessment and control for behavior of dump trucks frames with crack defects]. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering & technologies*, 2012, vol. 5, no. 6, pp. 703–714 (in Russ.).