

откуда окончательно получим формулу:

$$y_C = -\frac{5Fl^3}{384(EI_x)_c}. \quad (10)$$

Последняя формула (10) позволяет вычислить прогиб двухопорной составной балки посередине пролета при жестком креплении стержней по торцам.

Таким образом, предложена методика определения деформаций при изгибе составной балки, которая основана на методе начальных параметров, но при этом учитывается влияние закрепления торцов стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феодосьев, В. И. Сопrotивление материалов / В. И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1999. – 572 с.
2. Подскребко, М. Д. Сопrotивление материалов: учебник / М. Д. Подскребко. – Минск : Высш. шк., 2007. – 800 с.
3. Дудяк, А. И. Деформации и напряжения в консольной балке в зависимости от способа крепления торцов консоли / А. И. Дудяк, В. М. Хвасько, А. Д. Сахнович // Приборостроение-2021: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 17–19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 174–175.
4. Дудяк, А. И. Изгиб составных балок / А. И. Дудяк, В. М. Хвасько // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / БНТУ; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 118–120.

Поступила 08.09.2023

УДК 539.3+621.8.035

Мойсейчик Е. А.¹, Мойсейчик А. Е.², Яковлев А. А.¹

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПО ИНФРАКРАСНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПОВЕРХНОСТИ

1. *Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*
2. *ЗАО «Струнные технологии», Минск, Беларусь*

Целью настоящей статьи является проявление возможностей инфракрасной компьютерной термографии для диагностики развития пластических деформаций стальных изделий. Изложены методика проводимых экспериментальных исследований. Приведены и проанализированы результаты экспериментов. Экспериментально 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.

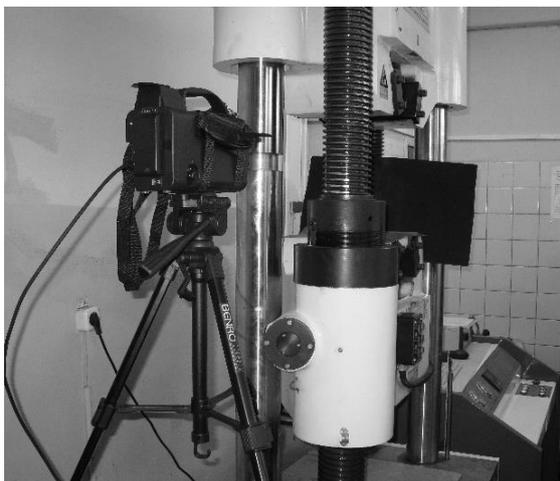
Введение. Работоспособность стальных элементов, содержащих конструктивно-технологические дефекты, существенно зависит от кинетики зарождения, развития и локализации пластических деформаций, от поведения материала при больших упругопластических деформациях [1–3]. Деформирование с образованием локализованных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

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]. Этим методам наряду с достоинствами (измерения деформаций по всему полю зрения и др.) присущи и недостатки (трудоемкость эксперимента, использование сложной аппаратуры, ограниченные возможности в условиях производства и эксплуатации и др.). 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 [5–7]. 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].

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 минус 40 °С 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. Силовое нагружение производили в гидравлической универсальной испытательной машине WAW-1000 (рис. 1). В качестве прибора, регистрирующего инфракрасное излучение испытуемого материала, использовался компьютерный портативный термограф «IRTIS-2000CH» (рис. 1). Измерение температурного поля исследуемых поверхностей проводилось в виде термофильма, который начинался за 15 сек до начала деформирования образца. Запись термофильма велась параллельно со съемкой в видимом спектре и завершалась через 10–15 сек после остановки испытательной машины. Одновременно со съемкой термо- и видеофильмов в характерных точках контролируемой поверхности температура поверхности фиксировалась термопарой.



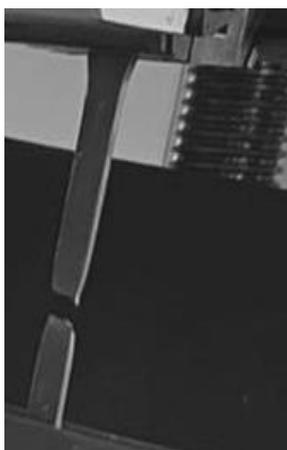
Технические характеристики «IRTIS-2000CH»:

- Чувствительность к перепаду температур на уровне 30 °С – 0,05 °С
- Диапазон измерений – (–40 до +1300) °С
- Диапазон рабочих температур – (–20 до +50) °С
- Погрешность измерения абсолютных температур по АЧТ – ± 1 % от изм. диапазона
- Число элементов разложения по строке – 320
- Число строк в кадре – 240
- Время формирования кадра (три скорости сканирования) – ≤ 0,8 сек., 1,6 сек., 3,2 сек
- Охлаждение камеры – жидкий азот

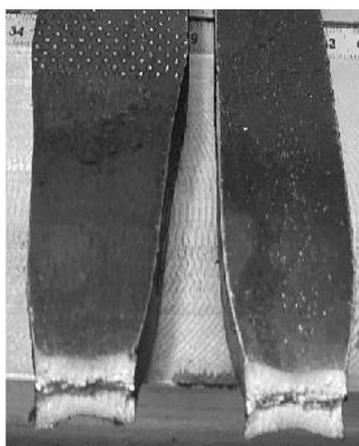
Рис. 1. Общий вид испытательной установки в составе компьютерного портативного термографа «IRTIS-2000CH» и гидравлической универсальной испытательной машины WAW-1000

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

Образец 1 толщиной 8 мм



Образец 2 толщиной 20 мм



Шейка в образце 2

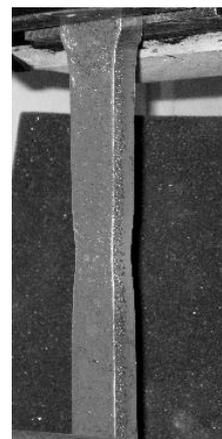


Рис. 2. Виды пропорциональных плоских образцов после разрушения

На рис. 3, 4 приведены термограммы для 10 кадра (конец упруго стадии работы материала) и 132 кадра (стадия начала разрушения – образование шейки). Сопоставление данных названных рисунков позволяет видеть, что температура приповерхностных слоев металла отличается от температуры металла, расположенного в срединной части образца. Из рис. 4, б следует, что в сечении, ближайшем к захвату испытательной машины (красная линия на рис. 4, а и 4, б) распределение деформационной температуры по ширине образца одинаково. С удалением от захвата машины (синяя, зеленая, розовая линии) 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 достигло 4,5 °С. В стадии образования шейки (рис. 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.

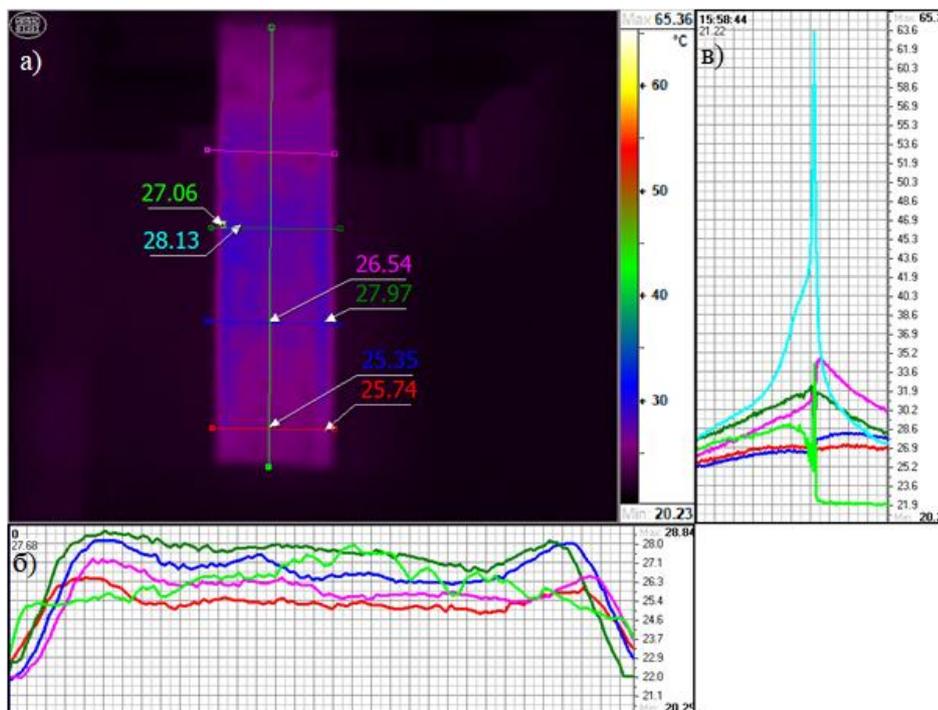


Рис. 3. Термограмма (кадр 10) деформирования образца 2 (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

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 сопротивление 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 мм и 20 мм и соответствующими максимальными деформационными температурами гладких образцов (желтый и оранжевый цвета) показана на рис. 5.

Растяжение пластин с боковыми надрезами. Такие пластины толщиной 20 мм и данные их термографии при растяжении показаны на рис. 6–15. Надрезы выполнялись как на меньшей стороне пластины, так и на большей (рис. 6).

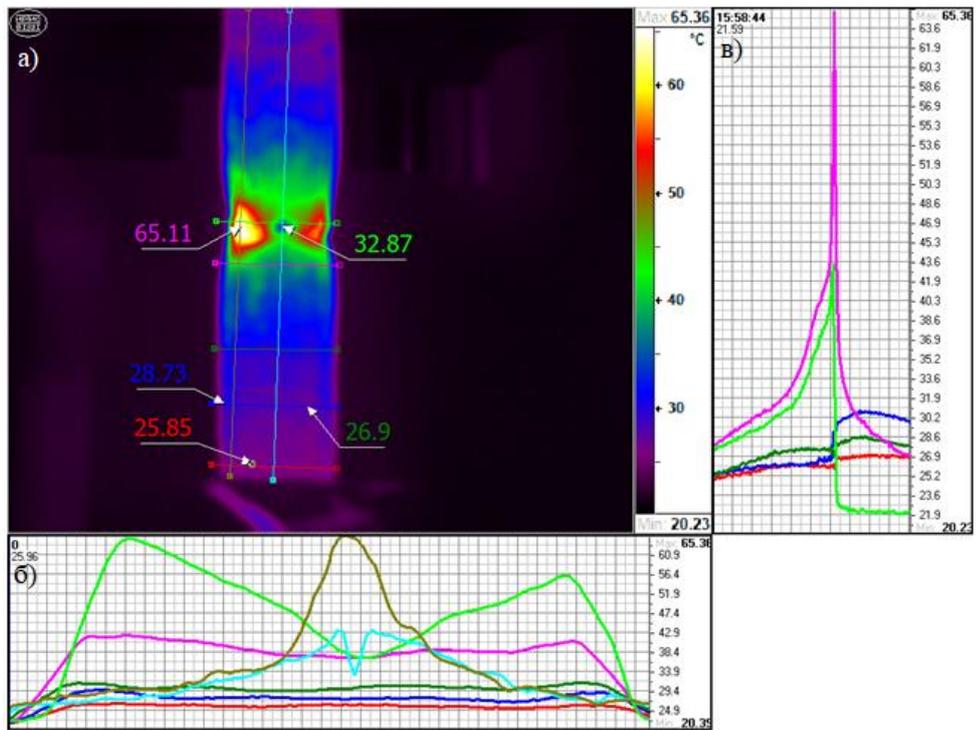


Рис. 4. Термограмма (кадр 132) деформирования образца 2 при образования шейки (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

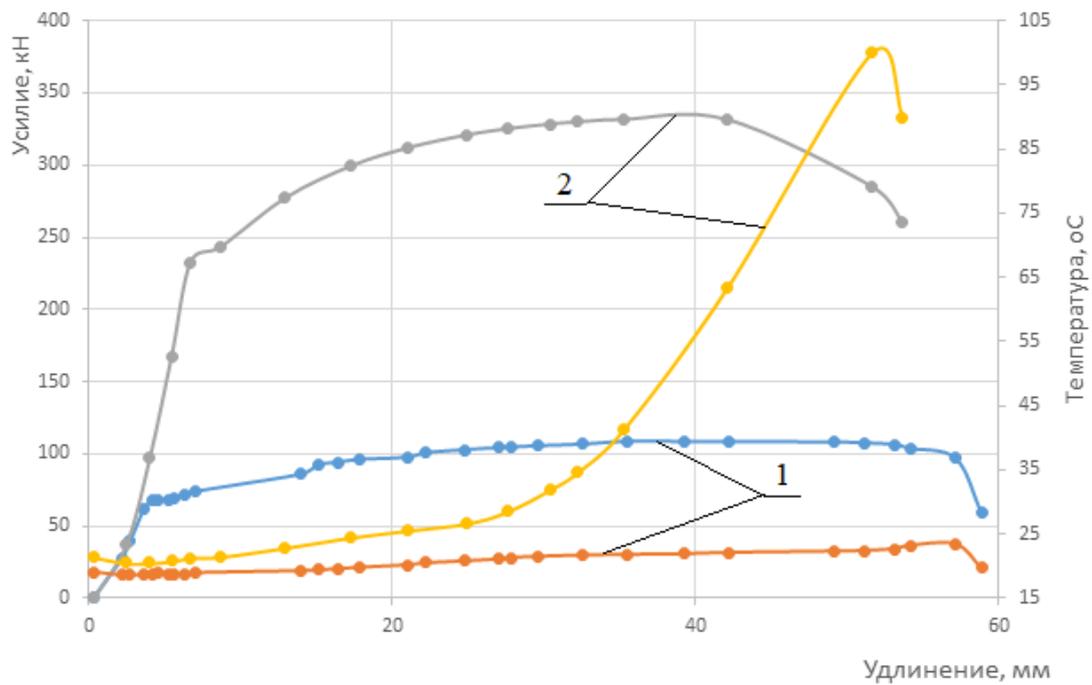


Рис. 5. Машинные диаграммы для пропорциональных образцов толщиной 8 мм (1) и 20 мм (2) и изменение соответствующих максимальных деформационных температур

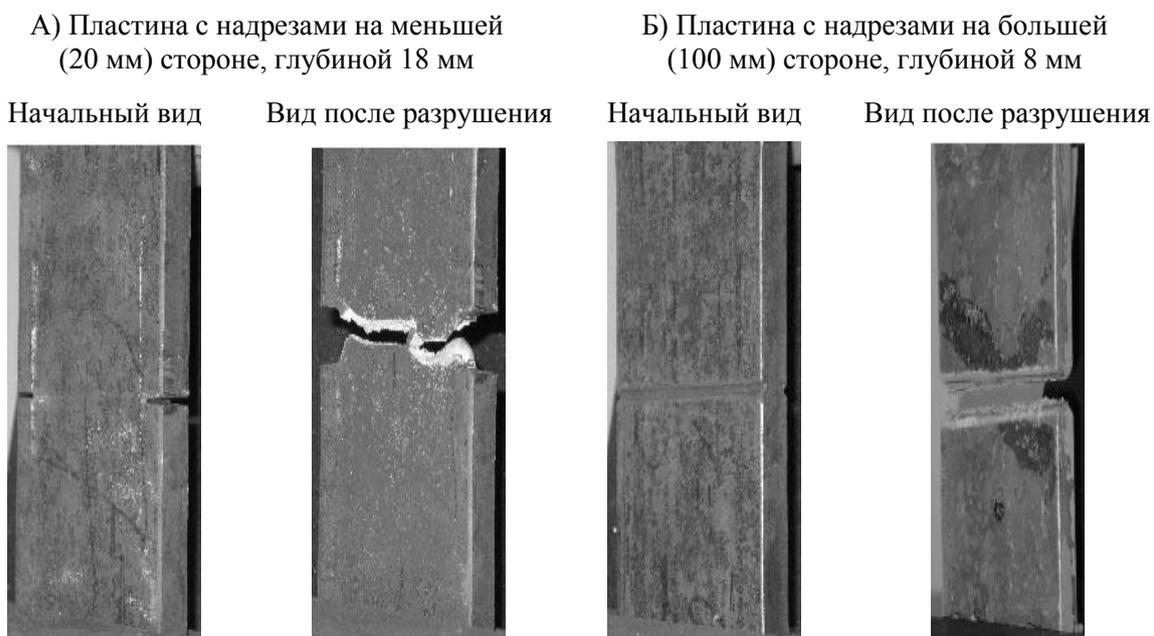


Рис. 6. Вид пластин с боковыми симметричными надрезами

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

Термограмма кадра 48 для пластины с надрезами на меньшей стороне (рис. 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 рис. 7, а 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.

Описанную последовательность деформирования образца подтверждает и анализ кинетики температурного поля поверхности в процессе нагружения (рис. 8, б, в). Последовательные термо- и видеокadres 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 рис. 7, в (линия выделена красным цветом). Изменение температуры по сечениям поверхности 5–8 (рис. 7, а, рис. 7, б) 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.

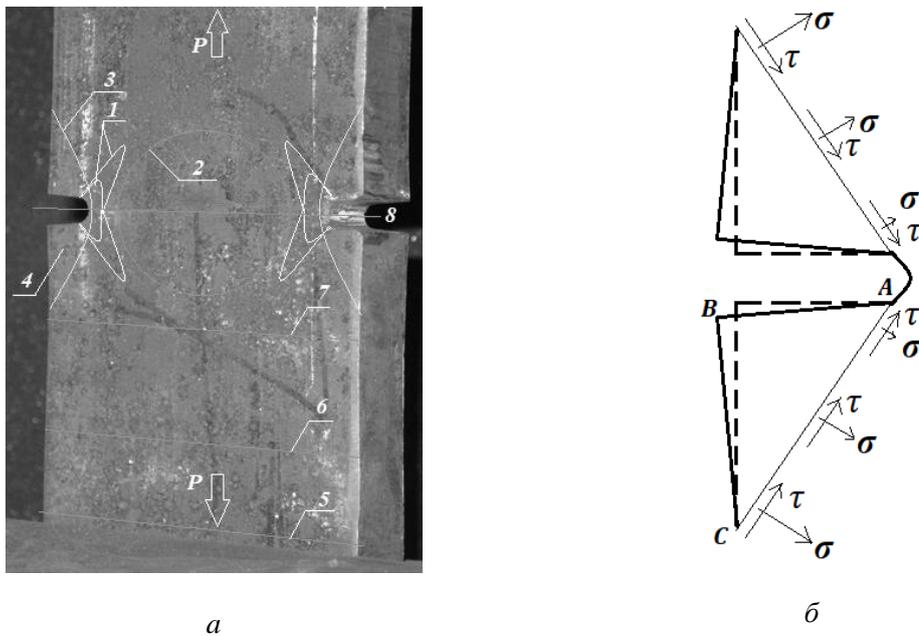


Рис. 7. Вид деформируемого образца с надрезами на меньшей стороне и поясняющими схемами

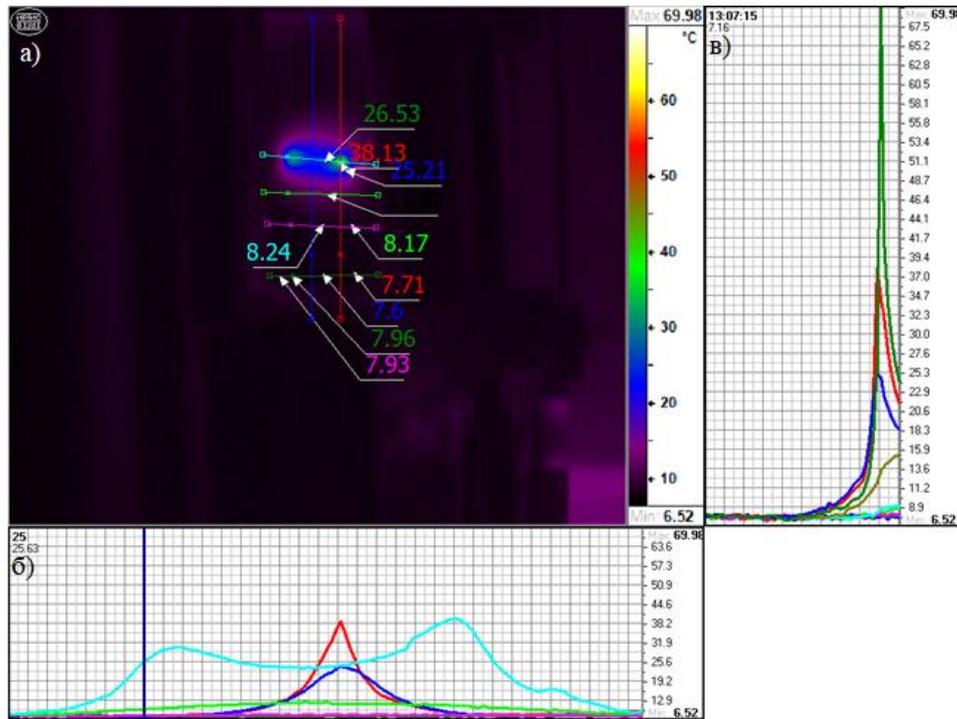


Рис. 8. Термограмма (кадр 48) деформирования образца при образовании шейки (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

На рис. 7, а можно заметить, что примыкающие к надрезу участки образца в процессе деформирования теряют устойчивость положения, выразившемся в изменении первоначального положения (штриховые линии на рис. 7, б) на новое (сплошные линии на рис. 7, б), 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 (рис. 9) с началом зарождения трещины в зоне пластических деформаций у основания надреза.

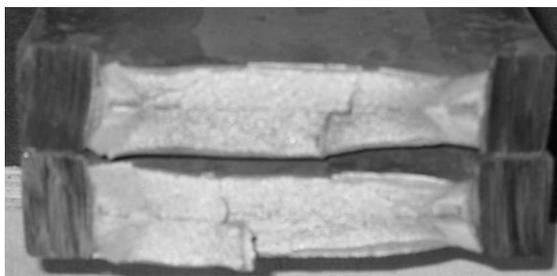


Рис. 9. Вид излома образца типа А

Пластина Б (испытание при комнатной температуре). Излом пластины типа Б – хрупкий (рис. 10). Температурное поле поверхности образца типа Б за секунду до излома представлено на рис. 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.

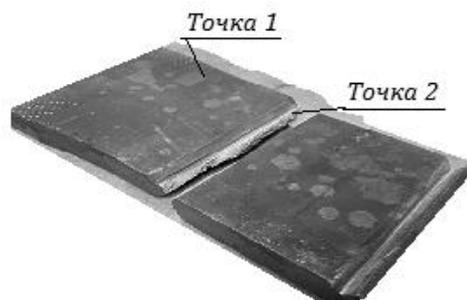


Рис. 10. Вид излома образца типа Б

Изменение температуры образца в выделенных точках 1 и 2 (рис. 10) при деформировании образца показано на рис. 12.

Пластина Б (испытание при низкой температуре). Начальная температура образца после установки в захваты испытательной машины равнялась минус 43°С (рис. 13). Излом пластины типа Б – хрупкий (рис. 13). Распределение температур поверхности показано на рис. 14.

Рис. 14 и 15 показывают, что массивные захваты, имеющие комнатную температуру, достаточно быстро передают тепло примыкающим охлажденным частям образца, что привело к повышению температуры образца на 20 °С за примерно 4,5 минуты. В очаге зарождения трещины температура металла поднималась от минус 26 °С до максимального значения плюс 11,5 °С.

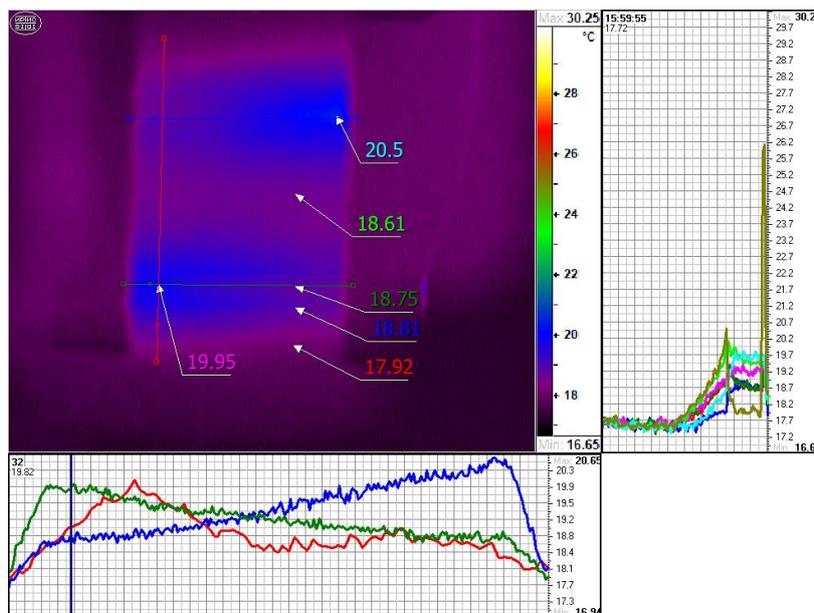


Рис. 11. Термограмма (кадр 87) деформирования образца типа Б за секунду до излома (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

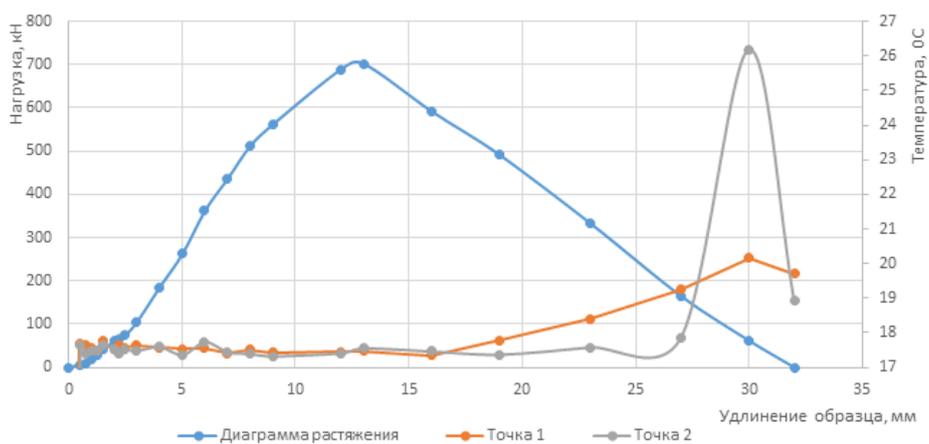


Рис. 12. Взаимосвязь максимальных температур в точках 1 и 2 с машинной диаграммой

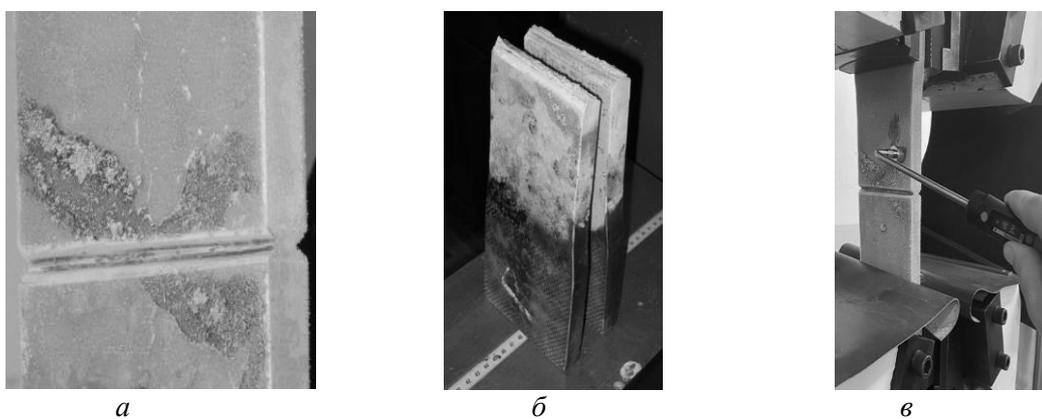


Рис. 13. Вид предварительно охлажденного образца типа Б с одним парным надрезом до и после нагружения

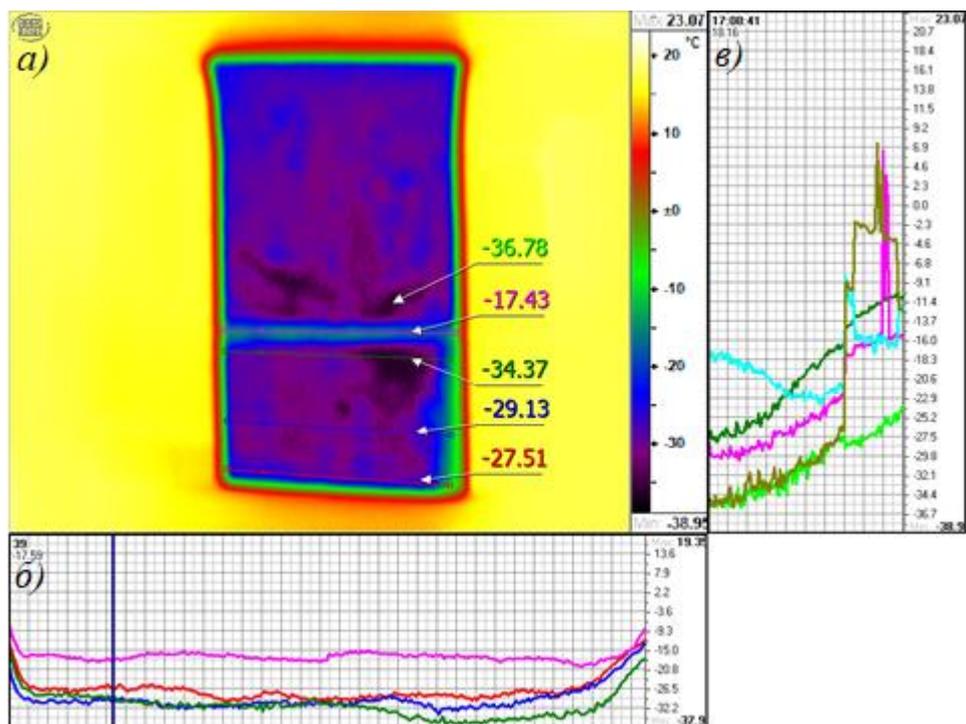


Рис. 14. Термограмма (кадр 1 из 128) деформирования охлажденного образца типа Б (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

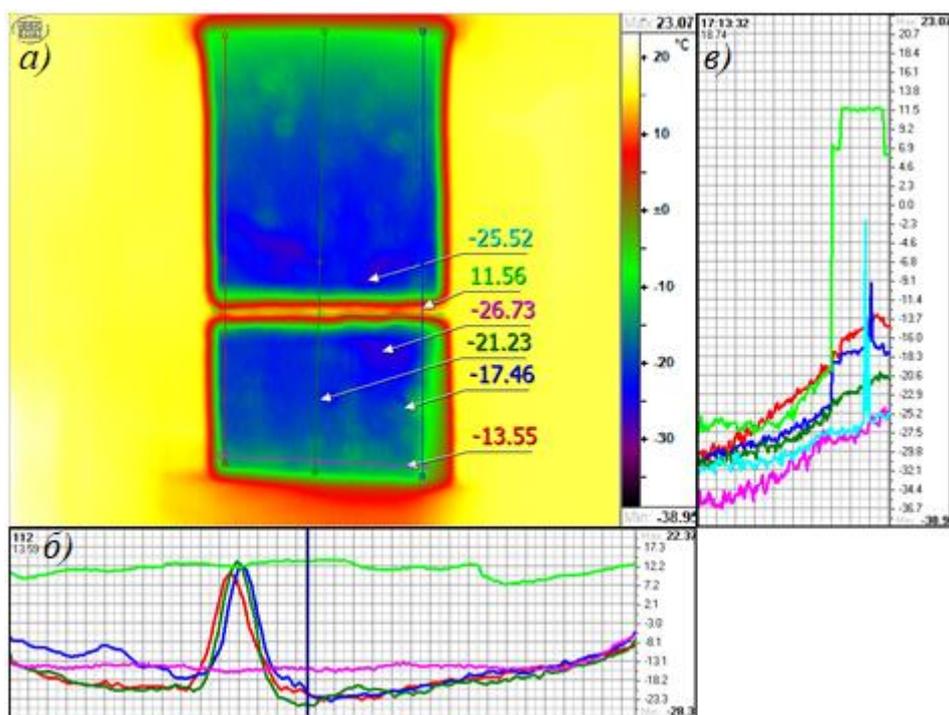


Рис. 15. Термограмма (кадр 123 из 128) деформирования охлажденного образца типа Б (а) и графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и точкам за время испытания образца (в)

Заключение.

1. В статье экспериментально 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.

2. 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.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жильмо, Л. Характеристика свойств конструкционных сталей работой предельной деформации // *Современные проблемы металлургии: Сб. науч. тр. ИМЕТ.* – М.: АН СССР, 1957. – С. 572–582.
2. Красневский, С. М. Разрушение металлов при пластическом деформировании // С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. – Минск : Наука и техника. – 1983. – 173 с.
3. Потапкин, А. А. Проектирование стальных мостов с учетом пластических деформаций / М.: Транспорт, 1984. – 201 с.
4. Панин, В. Е. Природа локализации пластической деформации твердых тел // В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, А. В. Панин, Д. Д. Моисеенко / *Журнал технической физики.* – 2007. – Т. 77. – Вып. 8. – С. 62–69.
5. NDE Handbook: Non-Destructive Examination Methods for Condition Monitoring/ Knud G. Vøving (Editor). – Butterworth-Heinemann. – 2014. – 428 p.
6. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О. Н. Будадин [и др.]. – М.: Наука, 2002. – 472 с.
7. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – 2 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 / *Вестник Пермского университета.* – 2018. – Вып. 2 (40). – С. 52–57.
10. Изюмова А. Ю., Вшивков А. Н., Прохоров А. Е., Плехов О. А., Венкантраман Б. Исследование эволюции источников тепла в процессе упругопластического деформирования титанового сплава ОТ4-0 на основе контактных и бесконтактных измерений // *Вестник ПНИПУ. Механика.* – 2016. – № 1. – С. 68–81.
11. Костина А. А., Баяндин Ю. В., Плехов О. А. Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов // *Физическая мезомеханика.* – 2014. – Т. 17. № 1. – С. 43–49.

12. Мойсейчик, Е. А. Моделирование работы и термография растянутых сварных соединений стальных конструкций с парными накладками / Е. А. Мойсейчик, С. Д. Шафрай // Вестн. гражд. инженеров. – 2014. – № 6 (47). – С. 58–63.

13. Moysychik, E. A. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects / E. A. Moysychik, V. P. Vavilov // International Journal of Damage Mechanics. – 2018. – Vol. 27. – Iss. 6. – P. 950–960.

14. Oliferuk W., Maj M., Zembrzycki K. Determination of the Energy Storage Rate Distribution in the Area of Strain Localization Using Infrared and Visible Imaging // Exp. Mech. – 2015. – V. 55. – P. 753–760.

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.

Поступила 16.12.2023

УДК 621.83.06

Прудников А. П.

ПРОЧНОСТНОЙ И ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ ПЛАНЕТАРНОЙ ТОРОВОЙ ВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

В статье рассмотрена конструкция малогабаритной планетарной торовой винтовой передачи с радиальной компоновкой звеньев, обладающей высокими нагрузочной способностью, плавностью и кинематической точностью, широким диапазоном реализуемых передаточных отношений, предназначенной для приводов мехатронных модулей, роботов и манипуляторов, создания мотор-редукторов, буровой техники, механизированных приспособлений. Проведен прочностной и тепловой анализ планетарной торовой винтовой передачи, в том числе с использованием метода конечных элементов. Прочностной анализ позволяет получить зависимости для определения геометрических параметров основного элемента передачи (составного ролика), исходя из действующих на него усилий. Тепловой анализ позволяет установить картину распределения тепла в передаче и доказывает, что передача несмотря на компактные размеры эффективно рассеивает тепло.

Введение. Планетарная торовая винтовая передача благодаря своим малым габаритным размерам (до 200 мм) и высокой нагрузочной способности вследствие многопоточности [1] может применяться в качестве редуцирующих узлов в мехатронных модулях, роботах и манипуляторах, мотор-редукторах, буровой технике, механизированных приспособлениях.

Конструкция передачи приведена на рис. 1.

Принцип действия передачи заключается в том, что вращение ведущего вала 1, на торцевой торовой поверхности которого выполнена винтовая беговая дорожка 2, вынуждает поворачиваться вокруг своих осей составные ролики 5. В свою очередь составные ролики, совершая вращательное движение, взаимодействуют с беговыми дорожками 4, нарезанными на зафиксированном в корпусе передачи звене 3. Таким образом, составные ролики 5 посредством пальцев 6 одновременно взаимодействуют с беговыми дорожками 2 и 4. В результате наложенные связи вынуждают вращаться с редуцицией ведомый вал 7, в котором установлены составные ролики [2].

В качестве кривых, для образования беговых дорожек, предложено использовать Архимедову спираль, расположенную на торовой поверхности, образуемой рабочими