

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО РАСТЯЖЕНИЕМ ОБРАЗЦА

¹Василевич Ю. В., ²Мойсейчик А. Е., ¹Мойсейчик Е. А., ¹Яковлев А. А.

¹Белорусский национальный технический университет

²ЗАО «Струнные технологии»

Введение. В соответствии с ГОСТ Р 56511–2015 «Методы теплового вида. Общие требования» настройку и периодическую проверку работоспособности термографической аппаратуры проводят с использованием образцов. Проверку такой аппаратуры непосредственно перед проведением исследования объектов и в случае контроля методом сравнения с объектом стандартом рекомендуется выполнять на 2-х группах образцов, содержащих моделируемые дефекты. Изготовление первой группы образцов производится по технической документации разработчика аппаратуры, а изготовление образцов второй группы – выполняется потребителем аппаратуры. Более детальным нормативным требованиям на разработку контрольных образцов для настройки и работоспособности термографической аппаратуры, исследования дефектов не выявлено при анализе соответствующей литературы.

Трудности в разработке таких образцов для тепловых активных и пассивных методов на основе инфракрасной термографии затронуты в ряде публикаций [1; 2; 3; 4; 5]. В настоящее время инфракрасная термография часто используется для качественных исследований изделий [2; 6; 7–10]. Определение координат дефектов, размеров и глубины их заложения по характеристикам температурного поля поверхности исследуемого объекта можно отнести к задачам, частично решаемым методами современной тепловой диагностики. В ИЭС им. Е. О. Патона считают [1] актуальной задачей тепловой диагностики создание «средств и специального программного обеспечения, а также методик и соответствующей нормативной базы, которые бы позволяли по распределению температуры на начальных термограммах оценивать техническое состояние разнообразных объектов в реальных условиях их эксплуатации». Авторы статьи [3] отмечают, что для «развития теплового метода неразрушающего контроля необходимо не только всестороннее теоретическое и научно-техническое обоснование метода, но и наличие базы нормативно-технической документации, регламентирующей применение метода на промышленных объектах», а ключевым моментом «в решении этой проблемы является создание стандартных (настроечных) образцов».

Универсальных образцов для использования в тепловой диагностике различных объектов при стационарных и нестационарных тепловых воздействиях в литературных источниках не выявлено [2; 6; 7]. Имеется несколько предложений различных авторов по конструкции контрольных образцов, используемых при активной тепловой диагностике (рисунок 1). Для случая пассивной тепловой диагностики не установлено конструктивных форм контрольных образцов.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка конструктивной формы контрольных образцов, их конечно-элементный анализ с использованием программного комплекса ANSYS и анализ соответствующего температурного поля.

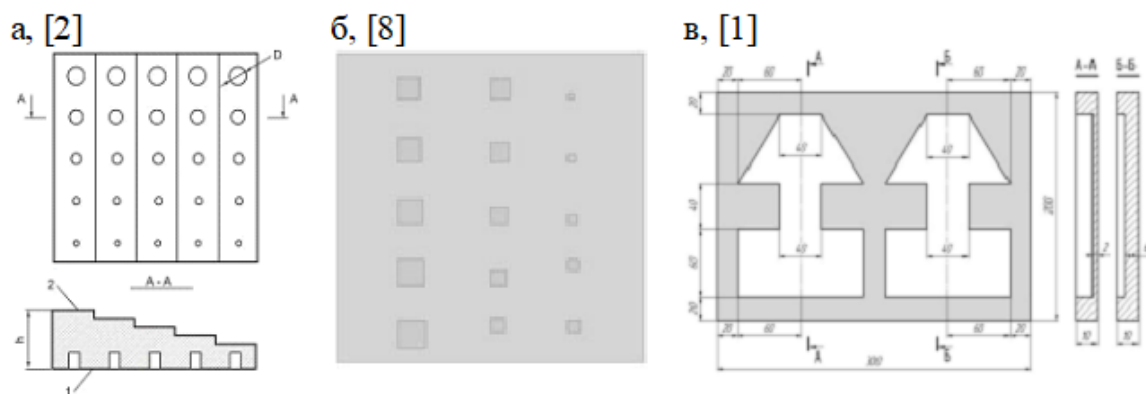


Рис. 1. Виды конструкций контрольных образцов для активных методов теплового контроля

Форма образцов. Такие образцы будем разрабатывать в предположении их применения в диагностике стальных листовых элементов, деформируемых растяжением в испытательной машине (пассивная тепловая диагностика). Учитывая, что разработка является пионерной, возможные дефекты будем имитировать на листовых элементах с использованием засверливаний различной глубины. Отверстия располагаем на минимальных расстояниях от кромок образцов и друг от друга (с учетом минимизации взаимного влияния силового влияния концентраторов напряжений друг на друга). Образцы предполагается изготавливать из той же стали, что и в исследуемых конструкциях. Конструктивные формы образцов представлены на рисунках 2–4.

Контрольные образцы предполагается подвергать квазистатическому растяжению при скорости деформирования 10–50 мм в минуту с параллельным термографированием процесса. Тепло в зоне дефектов будет вызываться деформационными источниками.

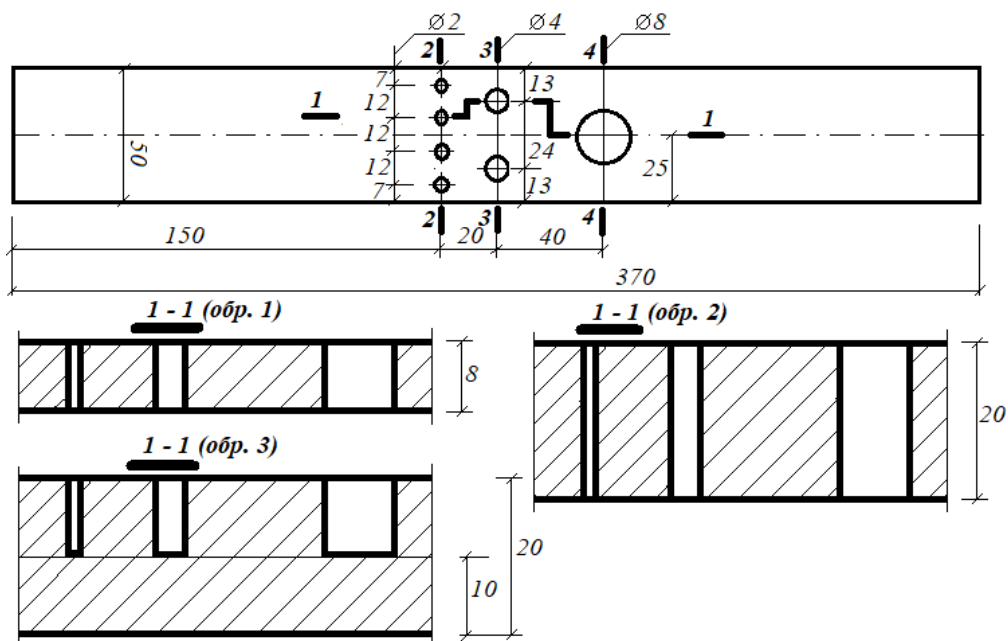


Рис. 2. План и сечение 1–1 образцов 1–3 (размеры в мм)

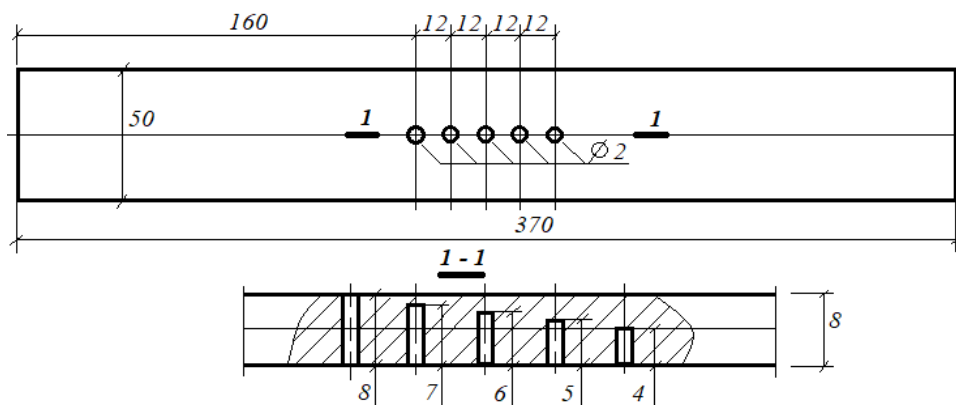


Рис. 3. План и сечение 1–1 образца 4 (размеры в мм)

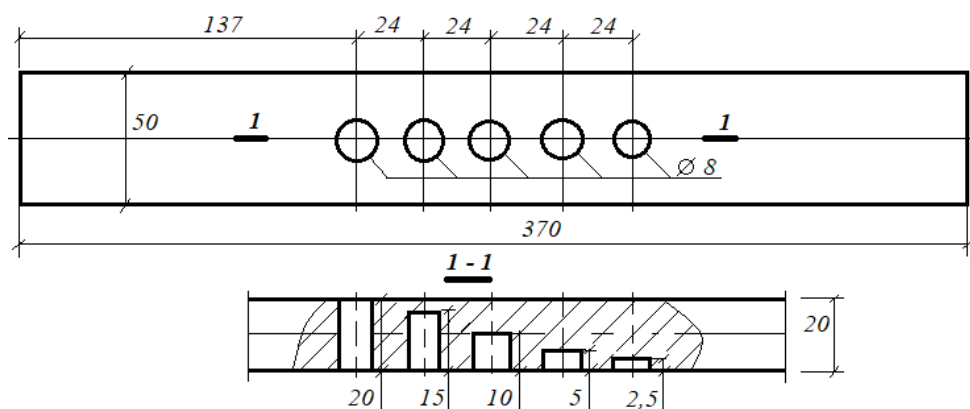


Рис. 4. План и сечение 1–1 образца 5 (размеры в мм)

Поэтому температурное поле поверхности будет отображать деформированное состояние образца принятой формы. За счет процесса теплопроводности внутри металлического образца тепловая энергия распространяется во всех направлениях. В зоне засверливаний тепловые потоки внутри образца перераспределяются и это приведет к появлению на передней и задней поверхности образца температурных аномалий. Температурные аномальные поля будут наблюдаться и регистрироваться в течение всего процесса деформирования с помощью тепловизора в форме термофильма. Амплитуда, форма и изменение во времени температурных сигналов станут теми информативными параметрами, которые позволят обнаруживать модельные дефекты (засверленные отверстия), а также оценивать их параметры (глубину расположения, изменения при деформировании).

Расчет и анализ НДС образцов. Важным этапом в разработке образцов является конечно-элементный анализ их напряженно-деформированного состояния в упруго-пластической стадии работы материала и расчет соответствующего температурного поля поверхностей и сечений образцов. Численным методом будем исследовать образцы 2–5 (рисунки 2–4) с использованием ПК ANSYS. Физико-механические характеристики материала образцов принимаем для стали 09Г2С.

Образцы нагружаем растягивающим усилием, определяемым по выражению

$$P = k \sigma_y A,$$

где σ_y – предел текучести;

A – площадь опасного поперечного сечения;

k – доля предела текучести материала образца.

Чтобы исследовать работу образца в упругой, пластической и частично в стадии самоупрочнения металла принимаем поочередно в расчете значения $k = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1$.

Результаты конечно-элементного расчета образцов 1–5 приведены на рисунках 5–9.

Анализ температурных полей образцов. На рисунке 10 у основания дефекта контрольного образца выделена область, являющаяся источником деформационного тепла, т. е. местным источником тепла. Сведем все выделяющееся деформационное тепло в точку O . Для дальнейшего обсуждения и анализа используем метод мгновенных источников [9]. Основное ограничение этого метода – источник должен сосредоточен в малом элементе объема, а область распространения тепла – весьма большая по сравнению с объемом источника.

В начальный момент времени $t = 0$ в бесконечно малом элементе объема $dV = dx dy dz$ неограниченного теплопроводящего тела с некоторой начальной температурой, сосредоточено количество тепла Q .

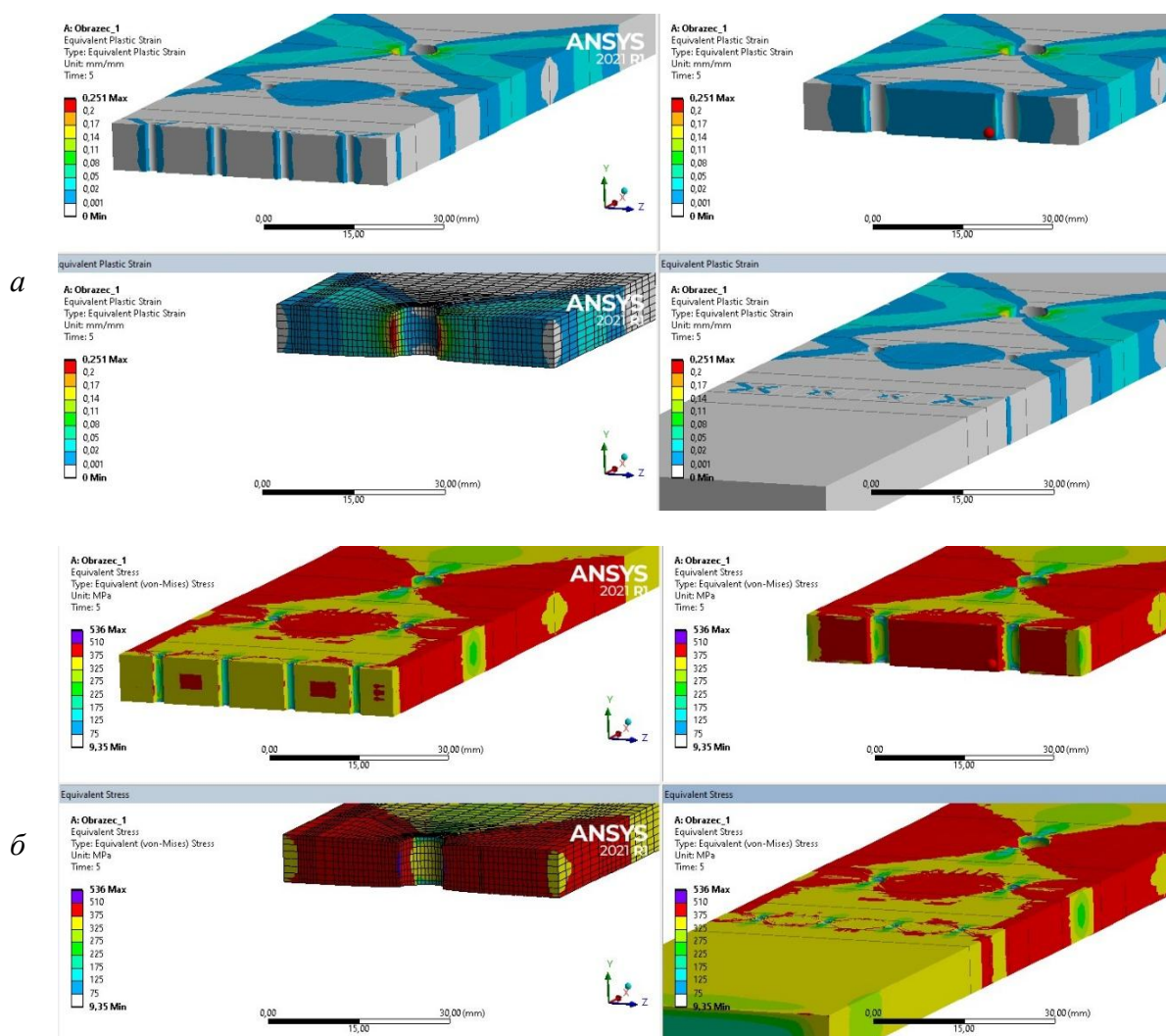


Рис. 5. Распределение деформаций (а), эквивалентных напряжений (б), и деформационной температуры (в) в сечениях 2–4 модельного образца 1

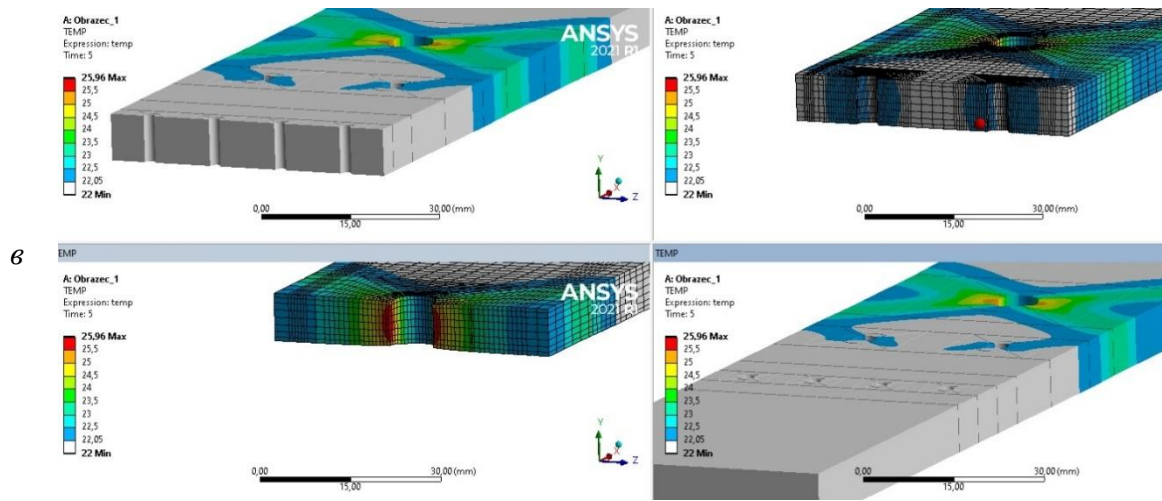


Рис. 5. (окончание)

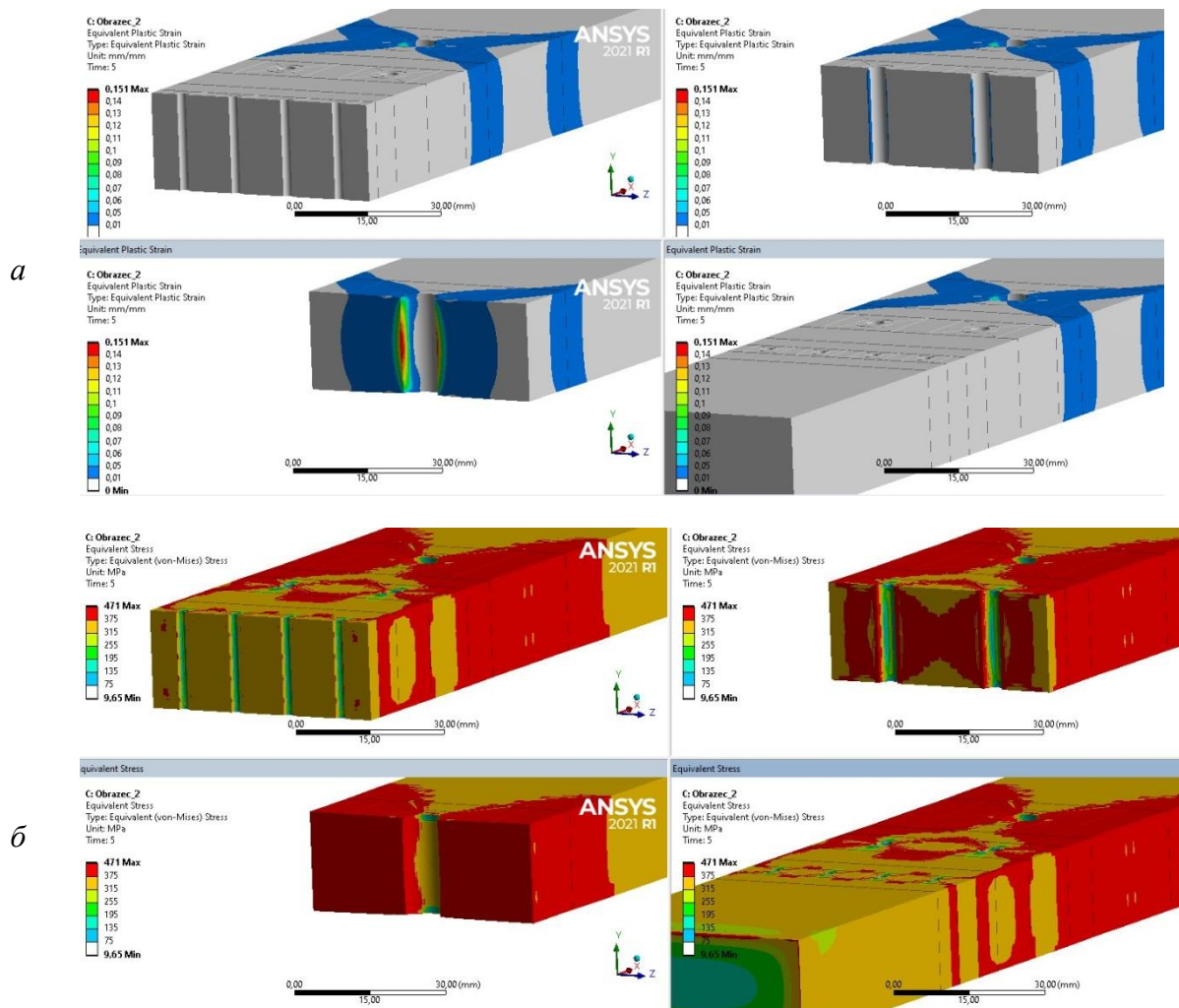


Рис. 6. Распределение деформаций (а), эквивалентных напряжений (б), и деформационной температуры (в) в сечениях 2–4 модельного образца 2

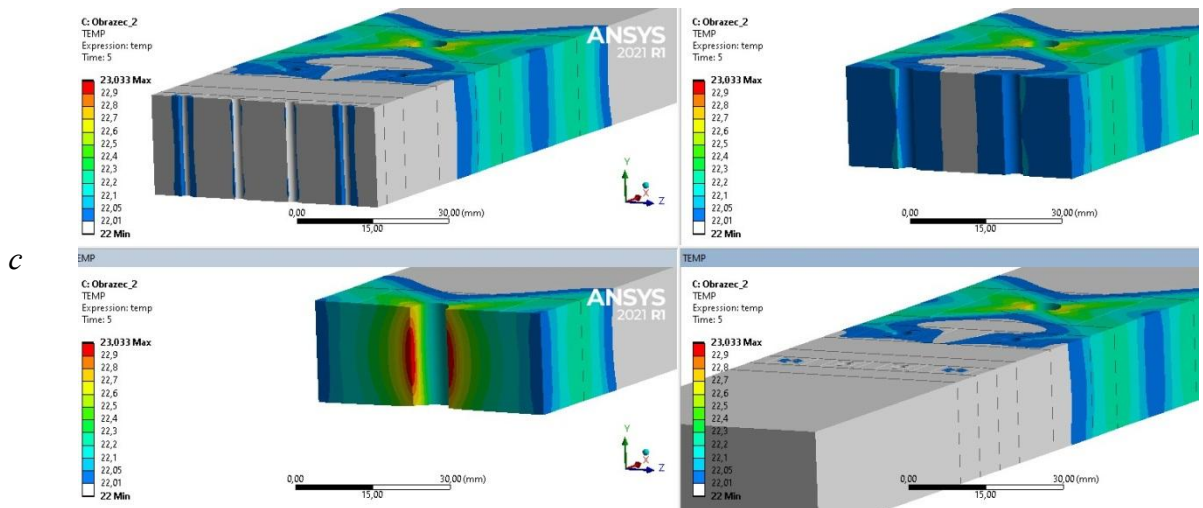


Рис. 6. (окончание)

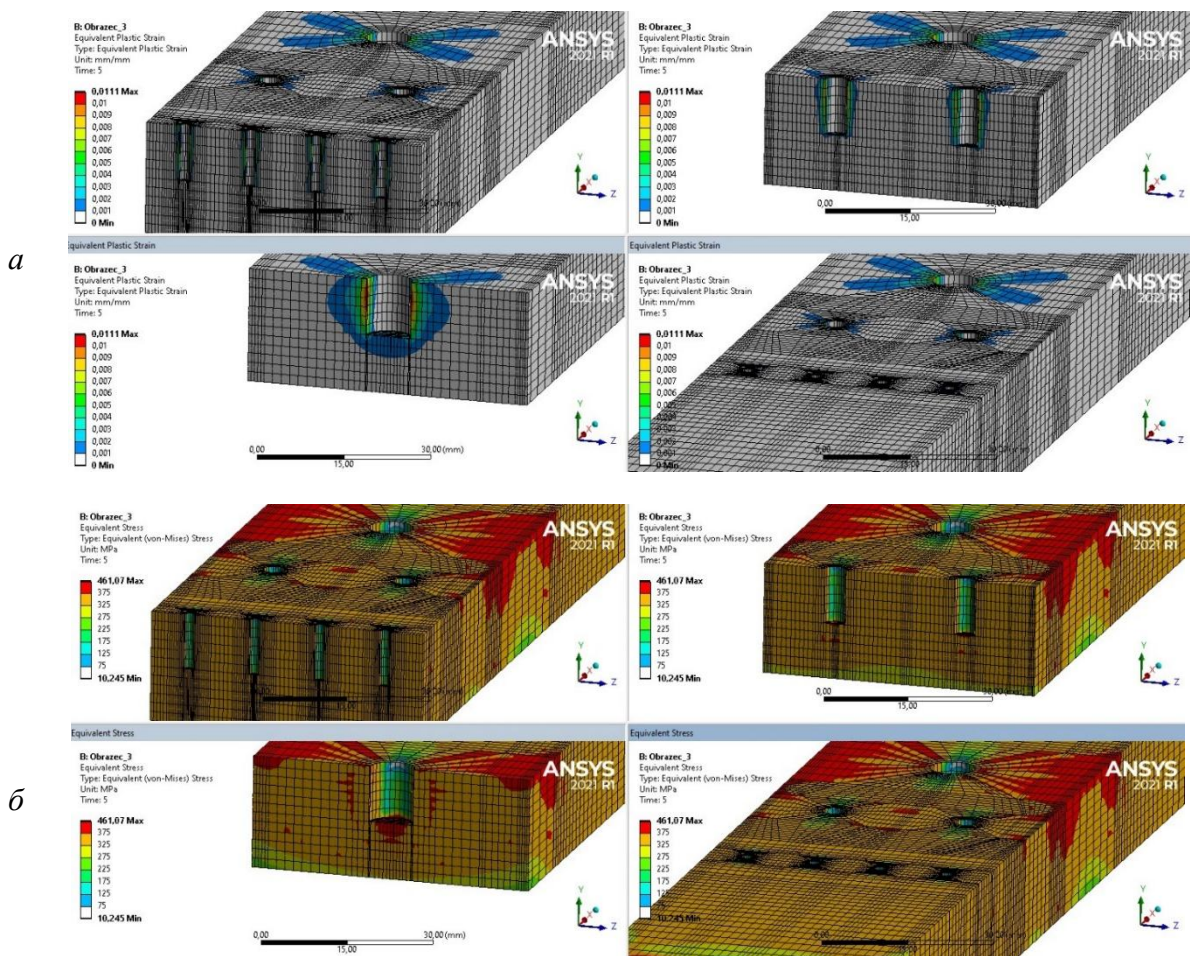


Рис. 7. Распределение деформаций (а), эквивалентных напряжений (б), и деформационной температуры (в) в сечениях 2–4 модельного образца 3

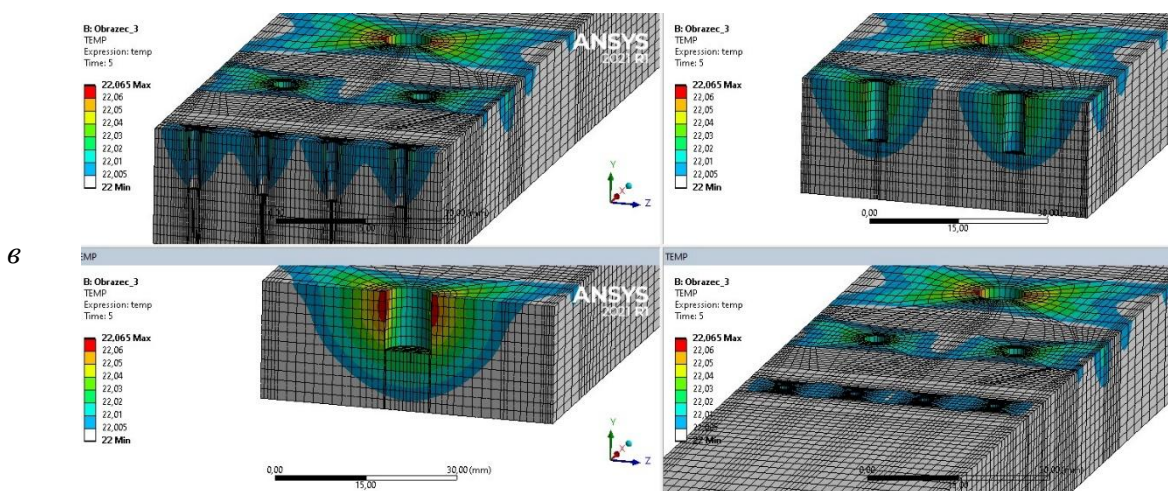


Рис. 7. (окончание)

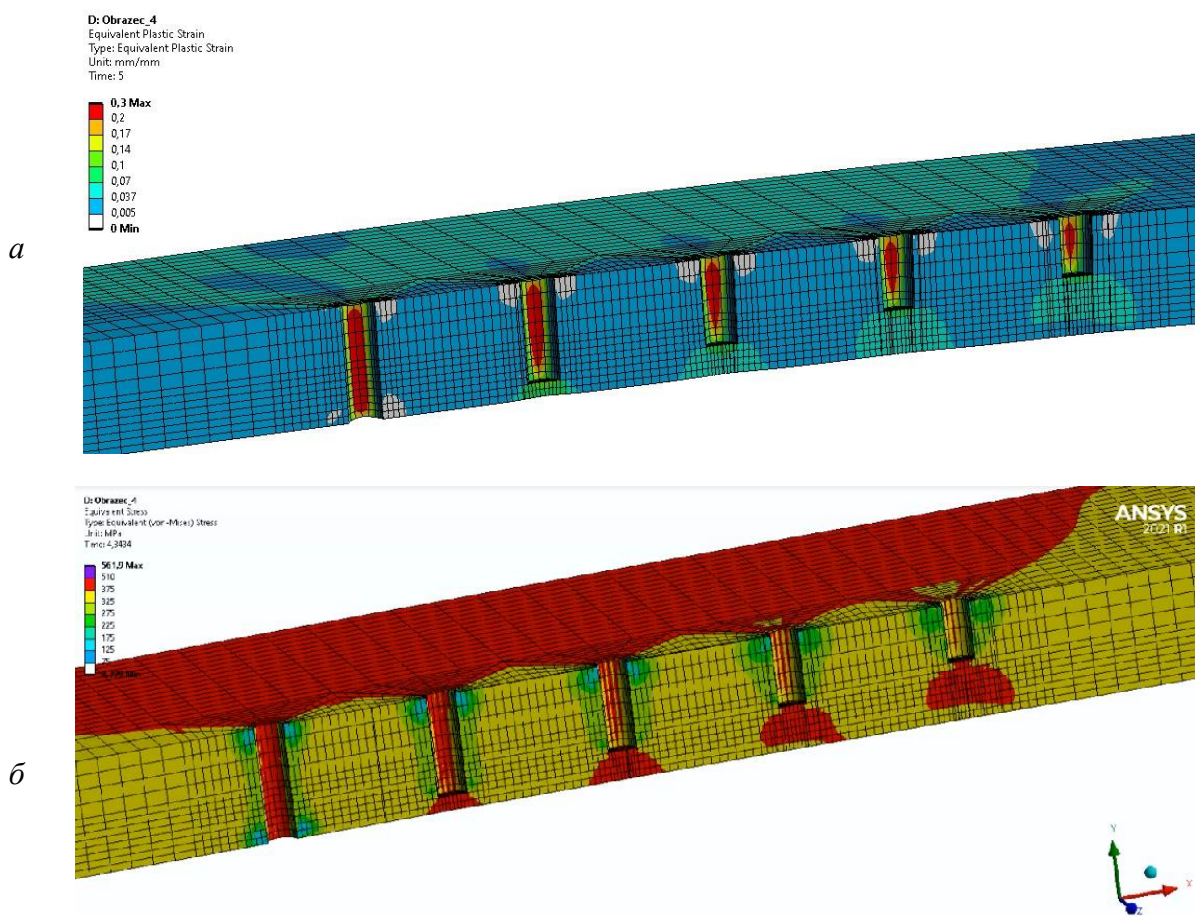


Рис. 8. Распределение эквивалентных деформаций (а), эквивалентных напряжений (б), и деформационной температуры (в) в сечении 1–1 модельного образца 4

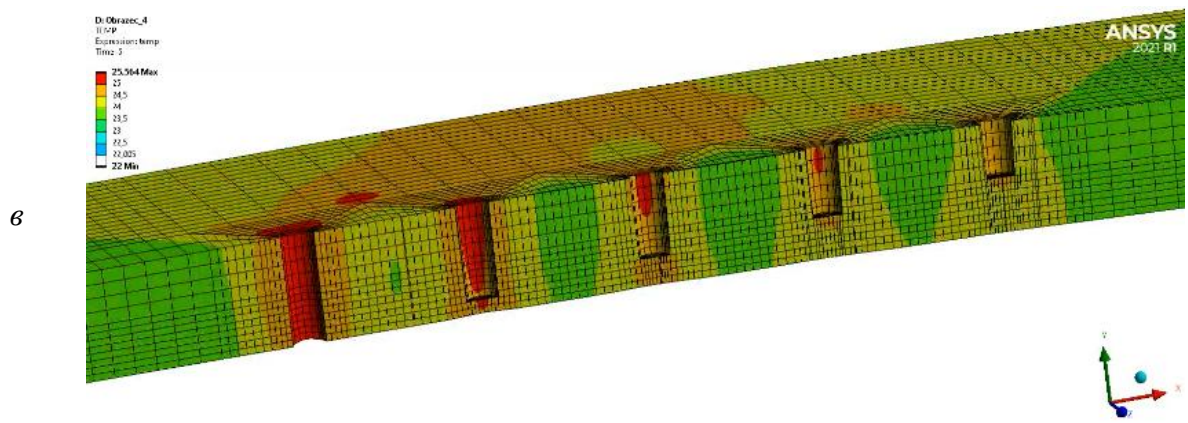


Рис. 8. (окончание)

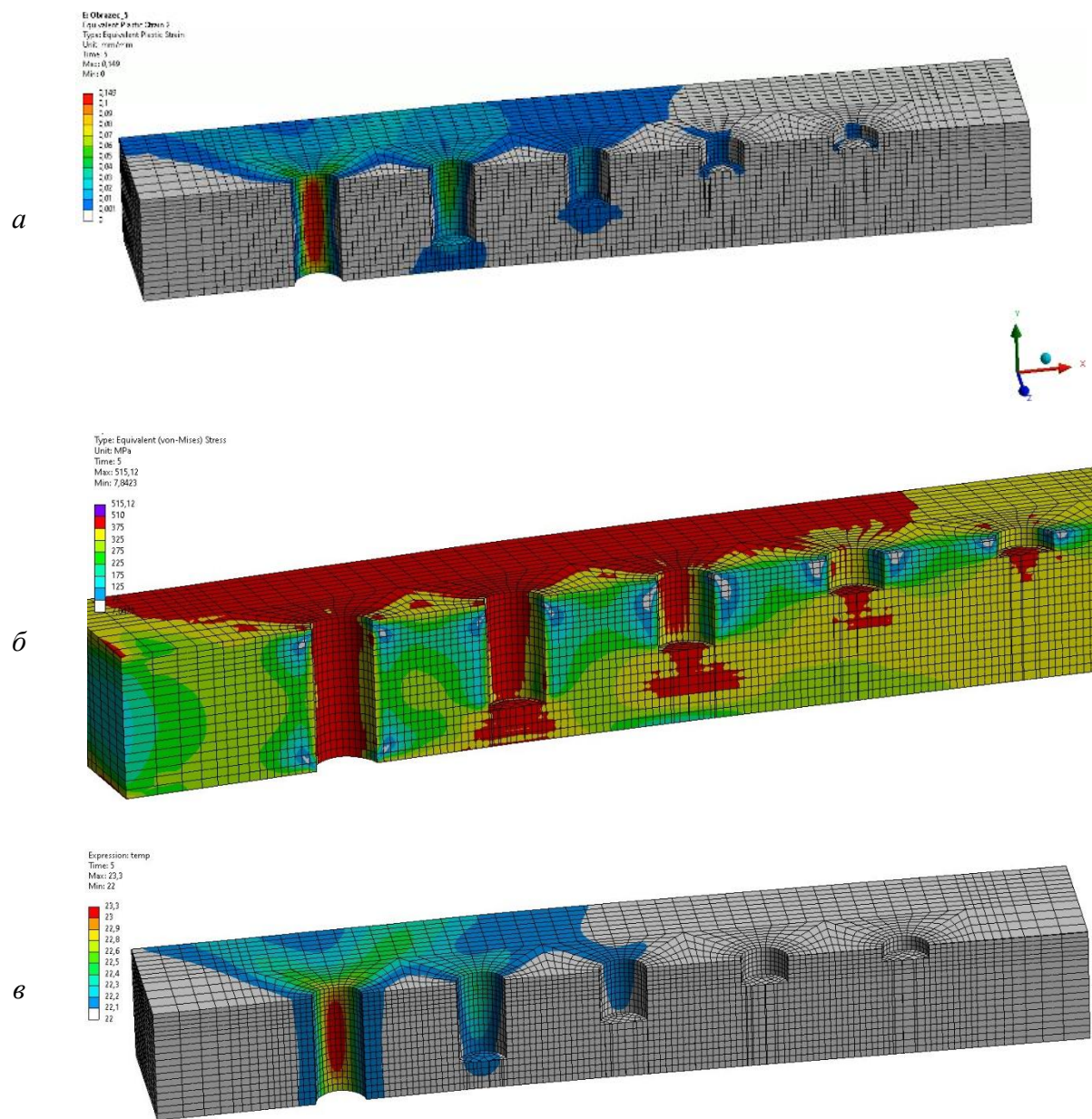


Рис. 9. Распределение эквивалентных деформаций (а), эквивалентных напряжений (б), и деформационной температуры (в) в сечении 1–1 модельного образца 5

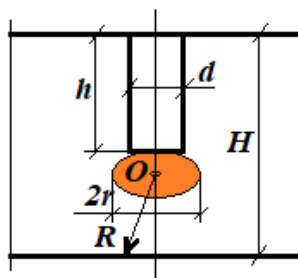


Рис. 10. Дефект контрольного образца и его параметры

Теплофизические свойства стали характеризуются коэффициентом теплопроводности λ , объемной теплоемкостью $c\gamma$ и коэффициентом температуропроводности a . Допускаем, что эти параметры остаются постоянными во время теплового воздействия и не зависят от температуры. Совместим с элементом объема dV начало O прямоугольной системы координат. Тогда процесс распространения тепла мгновенного сосредоточенного источника Q выразится уравнением [1]:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{1,5}} e^{-\frac{R^2}{4at}}, \quad (1)$$

где $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ – квадрат расстояния от источника тепла O до точки тела с координатами x, y, z .

Из выражения (1) следует, что температура произвольной точки тела определяется ее радиус-вектором R . Изотермические поверхности представляют собой сферы радиуса $R = \text{const}$ с центром в точке O .

Сопоставляя между собой рисунки 5–9, можно заметить, что объем области выделения деформационного тепла зависит от относительной глубины (h / H) засверленного отверстия, диаметра отверстия (d / h), напряженно-деформированного состояния в основании выточки, свойств материала. В первом приближении примем эту область сферической, диаметром kd (k – числовой коэффициент, зависящий от d / h , определяемый численным расчетом или экспериментальным путем). В первом приближении величина коэффициента может быть принята: для образца 4: $k = 2,4–3,0$; для образца 5: $k = 0,75–1,5$. Тогда Q можно рассчитать по зависимости:

$$Q = q V = q (1/6\pi k^3 d^3), \quad (2)$$

где q – количество тепла, выделяемого объемом dV ;

V – объем шара радиусом kr .

Минимальное значение модуля радиус-вектора можно определить по выражению:

$$R_{\min} = H - h - 0,5 k d, \quad (3)$$

Допустим, что $h / H \ll 1$, т. е. выражение (4.1) применимо для всех засверливаний, кроме сквозного отверстия.

Для фиксированного момента времени t_f можно найти отношение температур на гладкой поверхности образца по осям i -го и k -го засверливаний (при $R_k > R_i$):

$$\frac{T_k(R_k, t_f)}{T_i(R_i, t_f)} = \frac{q_k (k_k d_k)^3}{q_i (k_i d_i)^3} e^{\frac{R_i^2 - R_k^2}{4at_f}}. \quad (4)$$

Выражение (4) применимо для образцов типа 3, 4, 5 (при условии $h / H \ll 1$). Для пластин конечной толщины H с засверленными отверстиями выражения (1), (2) применять затруднительно из-за выхода сосредоточенных деформационных источников тепла на исследуемую поверхность образца.

В контрольном образце на внесенные засверливанием дефекты могут действовать несколько источников тепла, например, сочетание нагрева со стороны засверливания с деформационным нагревом.

Допустим, что мощность тепловых источников, коэффициенты теплопроводности и коэффициенты теплообмена не зависят от температуры. При таких допущениях температуру T_i в любой i -ой точке образца можно определить с учетом принципа суперпозиции температурных полей следующим выражением [10]:

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^n P_j k_{ji}, \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура (среды, материала образца);

P_j – мощность j -го теплового источника;

n – число источников;

k_{ji} – числовые коэффициенты, не зависящие от температуры внешней среды, мощности источников.

Исследование стационарного температурного поля образца с несколькими источниками тепла сводится к определению коэффициентов k_{ij} .

Рассмотрим три случая стационарного теплового воздействия на образец.

1-й случай (нагрев производится с засверленной поверхности образца, деформационный нагрев отсутствует). В этом случае формула (5) принимает вид:

$$T_i = T_0 + P_1 k_1. \quad (6)$$

2-й случай (нагрев с засверленной поверхности образца отсутствует; действует деформационный нагрев). Для этого случая температура в произвольной точке образца определяется аналогично по выражению (7):

$$T_i = T_0 + P_2 k_2. \quad (7)$$

3-й случай (суперпозиция 2-х предыдущих тепловых воздействий). Расчетное выражение для 3-го случая запишется в виде (8):

$$T_i = T_0 + P_1 k_1 + P_2 k_2. \quad (8)$$

Коэффициенты k_1, k_2 можно определить экспериментально или расчетом.

Выводы. При активном тепловом исследовании образцов по выражению (6) и соответствующей мощности внешнего нагрева можно выявлять искусственные дефекты (засверленные отверстия) и их параметры. По выражению (8) можно выявлять дефекты, которые имеют выход сосредоточенных деформационных источников тепла на исследуемую поверхность образца. В третьем случае, варьируя величиной P_1 при ограничении P_2 можно также выявить искусственные дефекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глуховський, В. Ю. Особливості створення систем оцінки геометричних параметрів дефектів методом тепловізійного контролю / В. Ю. Глуховський, В. О. Троїцький // *Методи та прилади контролю якості*. – № 2 (33). – 2014. – С. 5–12.
2. Maldague, X. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. – New York : John Wiley & Sons. – 2001. – 682 p. – (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering).
3. Подходы к созданию стандартных образцов для теплового неразрушающего контроля / В. А. Стороженко [и др.] // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2005 – № 1 – С. 21–25.
4. Evaluation of new designed reference blocks for calibration and NDT by optical and ultrasonic techniques / Mirham A. Y. Barakat, Mohamed Abdelwahab, Alshaimaa Waheed Abdallah // *Metrolog. Meas. Syst.*, – (2022). – Vol. 29. No. 4. – P. 719–736.
5. Non-destructive testing of metallic materials using passive and active infrared thermography / P. Bouteille [et al.] // *Mechanics & Industry* – 15, 1 (2014). – P. 313–321.
6. *Неразрушающий контроль: справочник* : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева; т. 5 : в 2 кн. : *Тепловой контроль*. / В. П. Вавилов ; *Электрический контроль* / К. В. Подмастерьев [и др.] – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 679 с.
7. Вавилов, В. П. *Инфракрасная термография и тепловой контроль* / В. П. Вавилов. – М. : ИД Спектр. – 2009. – 544 с.
8. Galagan, R. Statistical analysis of thermal nondestructive testing data / R. Galagan, A. Momot // *Advanced Information Systems*. – 2019. – Vol. 3, No. 1. – P. 58–62.
9. Рыкалин, Н. Н. *Расчеты тепловых процессов при сварке* / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
10. Дульнев, Г. Н. *Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах* / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семейкин. – Ленинград : Энергия, 1968. – 360 с.

Поступила: 15.05.2023