

Н. И. Базалеев, д.т.н., В. В. Брюховецкий, д.ф.-м.н., В. Ф. Клепиков, член-кор. НАН Украины, В. В. Литвиненко, д.т.н., Е. М. Прохоренко, к.ф.-м.н., докторант (Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины)

Особенности обнаружения дефектов в металлах при циклических напряжениях методом динамической термографии

Методом динамической термографии проведены исследования особенностей проявления дефектных структур в металлах при воздействии циклических напряжений. Экспериментально подтверждена возможность выявления современными тепловизионными средствами контроля термоявления структурных неоднородностей и дефектов в металлах при циклических нагрузках образцов.

Ключевые слова: тепловой контроль; динамическая термография; циклические напряжения, дефекты в металлах, тепловизионный контроль, дефектоскопия

Методом динамічної термографії проведено дослідження особливостей проявлення дефектних структур в металах при дії циклічних напружень. Експериментально доведено можливість виявлення сучасними тепловізійними засобами контролю термоявлення структурних неоднорідностей і дефектів у металах при циклічних навантаженнях зразків.

Ключові слова: тепловий контроль; динамічна термографія; циклічні напруження, дефекти в металах, тепловізійний контроль, дефектоскопія,

Dynamic thermography has been applied to study the particular qualities of the defect structures appeared in metals under the cyclic stress loads. It was experimentally confirmed the possibility to identify the thermal phenomena of the structural heterogeneities and defects in metals under cyclic loading using modern thermographic monitoring techniques.

Keywords: heat control, dynamic thermography, cycle stress, defects in metals, thermographic monitoring, defectoscopy

Введение

Одним из перспективных и динамично развивающихся способов контроля в настоящее время является тепловой контроль, основанный на методах инфракрасной термографии [1]. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или внешних дефектов: скрытых раковин, полостей, трещин, инородных включений. При нарушении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает избыточное температурное поле, характер которого позволяет получить информацию о свойствах объектов. Современные тепловизоры позволяют получать динамические ряды инфракрасной видеосъемки, то есть регистрировать не только мгновенное тепловое состояние объекта контроля, но и процесс его изменения во времени.

Динамическая термография базируется на анализе переходных процессов, вызванных эффектами изменения скорости распространения тепла в объектах контроля.

Преимуществом динамической термографии по сравнению со стационарными методами являются более высокий уровень термоявления дефектов (которые, как правило, незначительно влияют на стационарное распределение температуры) при переходных процессах. Особенно актуальным является применение динамической термографии для обнаружения дефектов в металлах, обладающих высокой теплопроводностью.

Локальное повышение температуры на поверхности может вызываться как за счет внутренних источников тепловыделения в объекте контроля, имеющих различную физическую природу, так и механических напряжений и вибрации [2, 3]. Существующие теоретические подходы к моделированию процессов генерации, распространения и рассеивания тепловых (температурных) волн в твердотельных объектах с неоднородностями различной формы и разной физической природы позволяют установить в общем виде связь тепловых процессов с характеристиками неоднородностей (дефектов) [3, 4]. В материалах с дефектами структу-

ры под воздействием внешней механической стимуляции возникают температурные поля, обусловленные рассеянием энергии колебаний на дефектах и превращением её в тепловую энергию за счет внутреннего трения и механического гистерезиса. В областях нарушения однородности структуры (дефектах) возникают локальные зоны перегрева объекта. Ранее активно развивались термоакустические методы с применением импульсного воздействия на дефект [5].

Постановка задачи

Целью данной работы является исследование возможности идентификации методом динамической термографии поверхностных температурных аномалий, которые возникают в местах существования внутренних дефектов в металлах в процессе их активации циклическими напряжениями.

Для практической реализации данного метода необходимо создание определенного циклического / акустического воздействия на объект контроля (активационное действие), при котором значения термоаномалий температурных полей на дефектных структурах,

которые проявляются на поверхности, являются достаточными для идентификации дефектов современными тепловизионными системами. Идентификация тепловых поверхностных аномалий в области внутренних дефектов (зонах интенсивного поглощения и рассеяния энергии упругих волн), осуществляется на основе анализа теплофизического состояния объекта контроля и учета особенностей формирования поверхностных температурных полей при изменении теплопроводности материала и наличия в нем дефектных структур.

Методика экспериментов

Исследования методом дистанционного термографического контроля динамики температурных полей проводились на специализированном стенде рис. 1 позволяющим имитировать различные виды активирующего воздействия на объект исследования: теплового, с использованием широкоформатного источника инфракрасного излучения или контактных нагревателей; циклические напряжения (вибрация) – инициируются генератором акустических (ультразвуковых) волн [6].

Конструктивной особенностью стенда является возможность как раздельной, так и одновременной активации образцов рис. 2 разными по физической природе энергетическими потоками (циклические напряжения $F(A, \omega, t)$, источник инфракрасного излучения Q), что позволяет использовать корреляционные методы обработки тепловых полей для выявления термопроявления дефектов (ΔT), повышения эффективности их идентификации.

Поле инфракрасного излучения объектов исследования фиксировали при помощи тепловизионной системы LIPS 814 (температурное разрешение – 0,08 °C; пространственное разрешение – 1,2 мрад; поле зрения – 21 × 16; детектор – 320 × 240, неохлаждаемый FPA микроболометр; спектральный диапазон 8 – 14 мкм; частота кадров – 24 Гц). Как источник циклических напряжений использовался генератор акустических волн УЗДН-22 (частота 22 кГц, мощность – 1,0 кВт, нагрузка на образец до 0,7 МПа) с пружинным (контактным) приспособлением передачи напряжения на объект исследования. Уровень акустической энер-

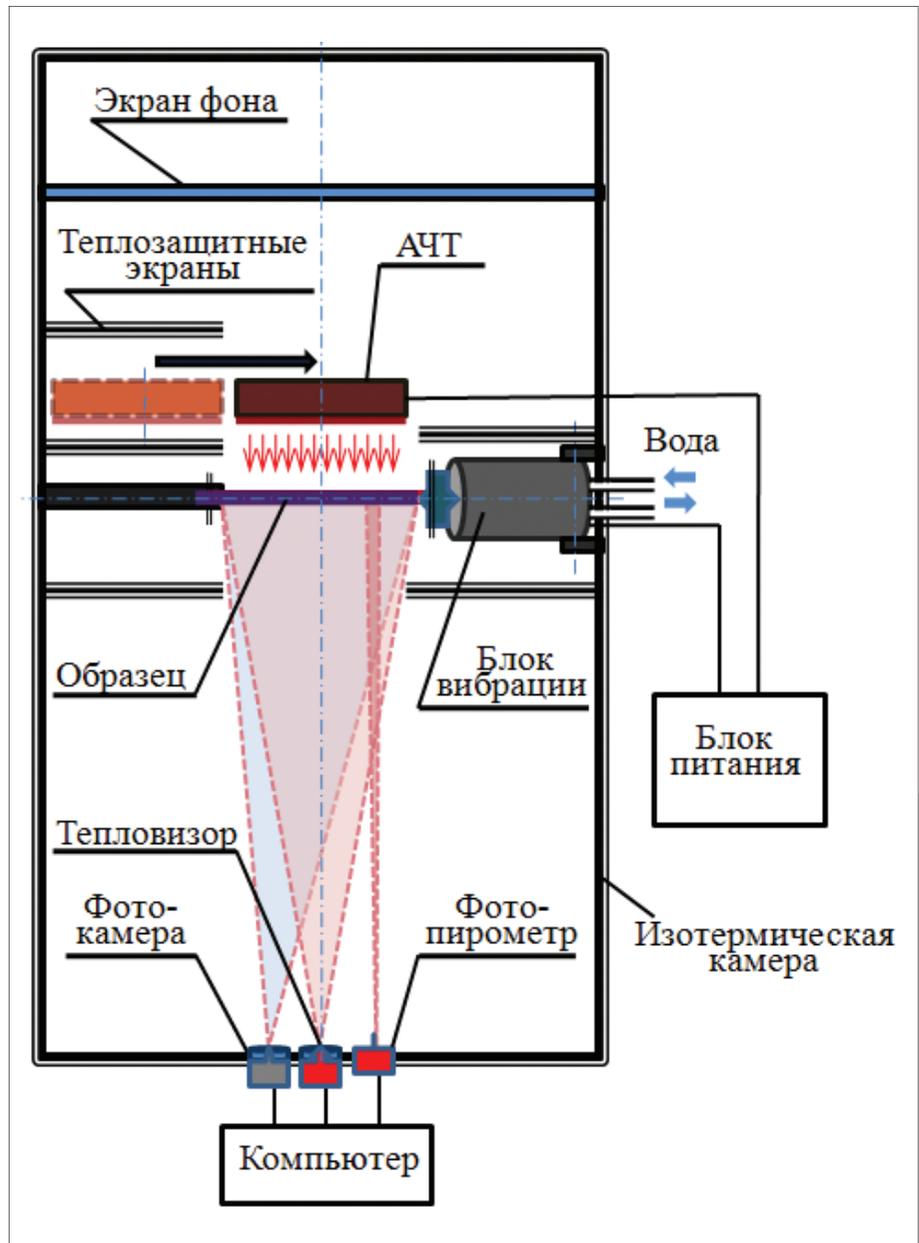


Рис. 1. Схема специализированного стенда для исследования термопроявлений дефектных структур в материалах методами активной инфракрасной термографии

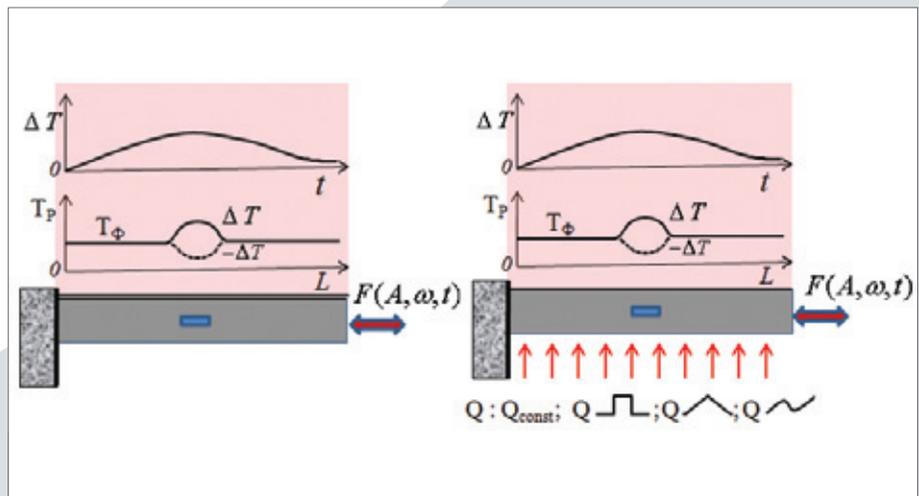


Рис. 2. Способы активации образцов

гии, подводимой к образцу, регулировался изменением прижимного усилия между образцом и опорой, а также выбором типа согласующего устройства между излучателем акустических волн и образцом. Объектом исследования были образцы из конструкционной стали (Сталь 35), изготовленные в виде прямоугольных пластин толщиной от 2,0 мм до 10 мм и размерами от 60 × 130 мм² до 150 × 210 мм², в которых были смоделированы два типа дефектов, рис. 3.

Тип 1 – дефекты сформированы гидродинамическим перемешиванием расплава металлов образца и электрода АНО-4 при электродуговом разряде с последующим шлифованием поверхности. Диаметр дефекта 3 – 10 мм. Такие дефекты

имитирует микроструктурную неоднородность металла. Тип 2 – дефекты в виде запрессованных в пластину цилиндров диаметром от 2 мм до 6 мм из конструкционной стали (электрод АНО-4), латуни, свинца и минеральной смеси типа накипь (имитируют инородные включения в образце). На подготовленных таким образом пластинах с дефектами с обеих сторон было нанесено лакокрасочное покрытие.

Результаты

На рис. 4 представлены термоизображения участка пластины с дефектом (а), график динамики термопроявления дефекта (б) и профильные термограммы по линии сечения образца, проходящей через дефект (в). Толщина пластины –

2 мм, диаметр дефекта – 6 мм. Активация образца осуществлялась циклическими напряжениями с частотой 22 кГц мощностью 0,1 кВт. Максимальная амплитуда термопроявления дефекта во времени наблюдается в интервале 60 – 90 секунд. Превышение фоновой температуры при этом составляет более 4 °С. Далее амплитуда термоаномалии в области дефекта уменьшается, а зона, охватывающая термоаномалию, расширяется за счет действия механизмов теплопроводности и рассеивания тепла. Термопроявление дефекта значительно снижается после 270 секунды действия акустической активации, по-видимому, через рассеивание тепла посредством механизма

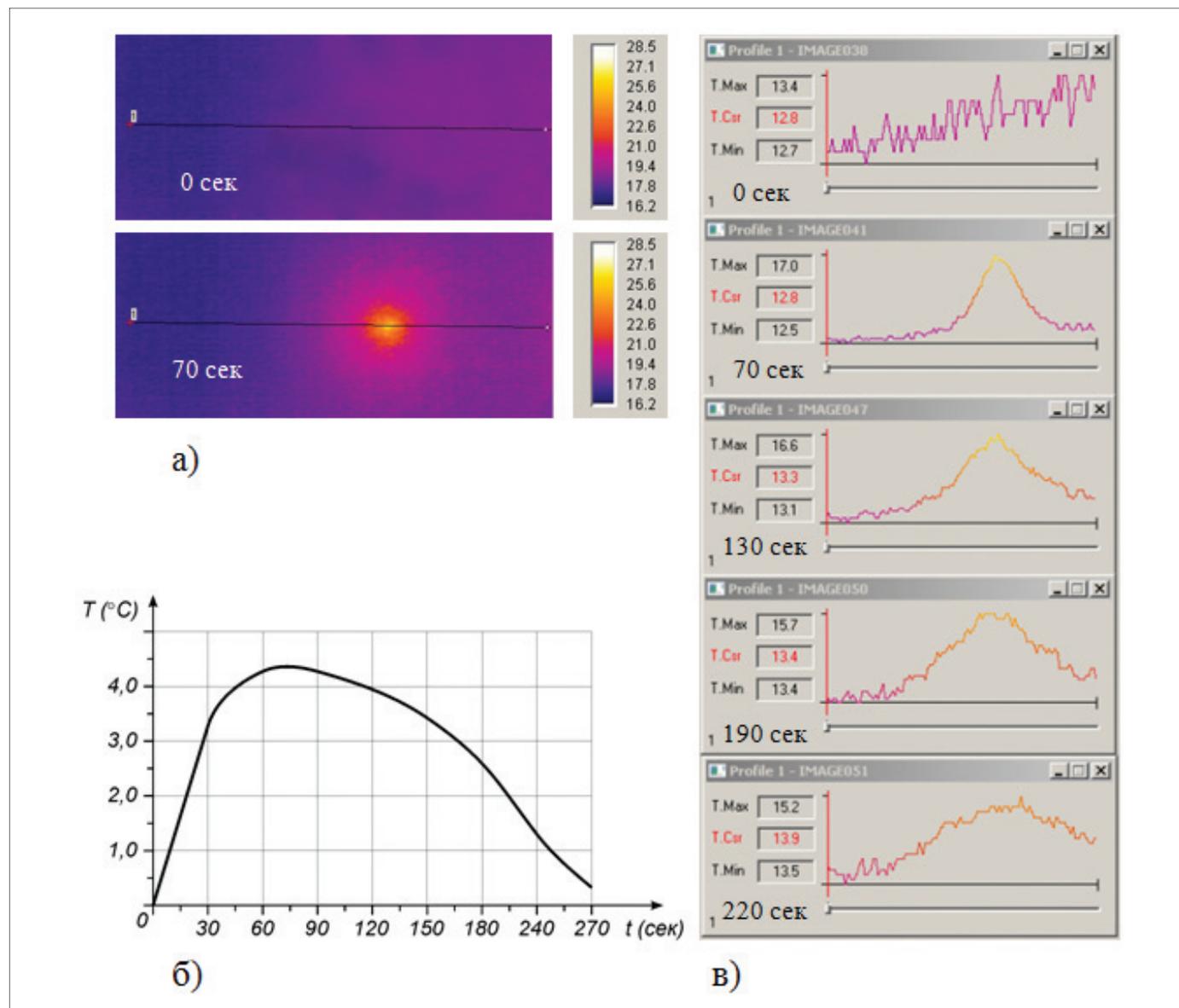


Рис. 3. Виды дефектов на образцах: а) – Тип 1, б) – Тип 2; 1 – форма/структура дефектов; 2, 3 – фотоизображения дефектных зон с лакокрасочным покрытием и частично удаленным лакокрасочным покрытием соответственно

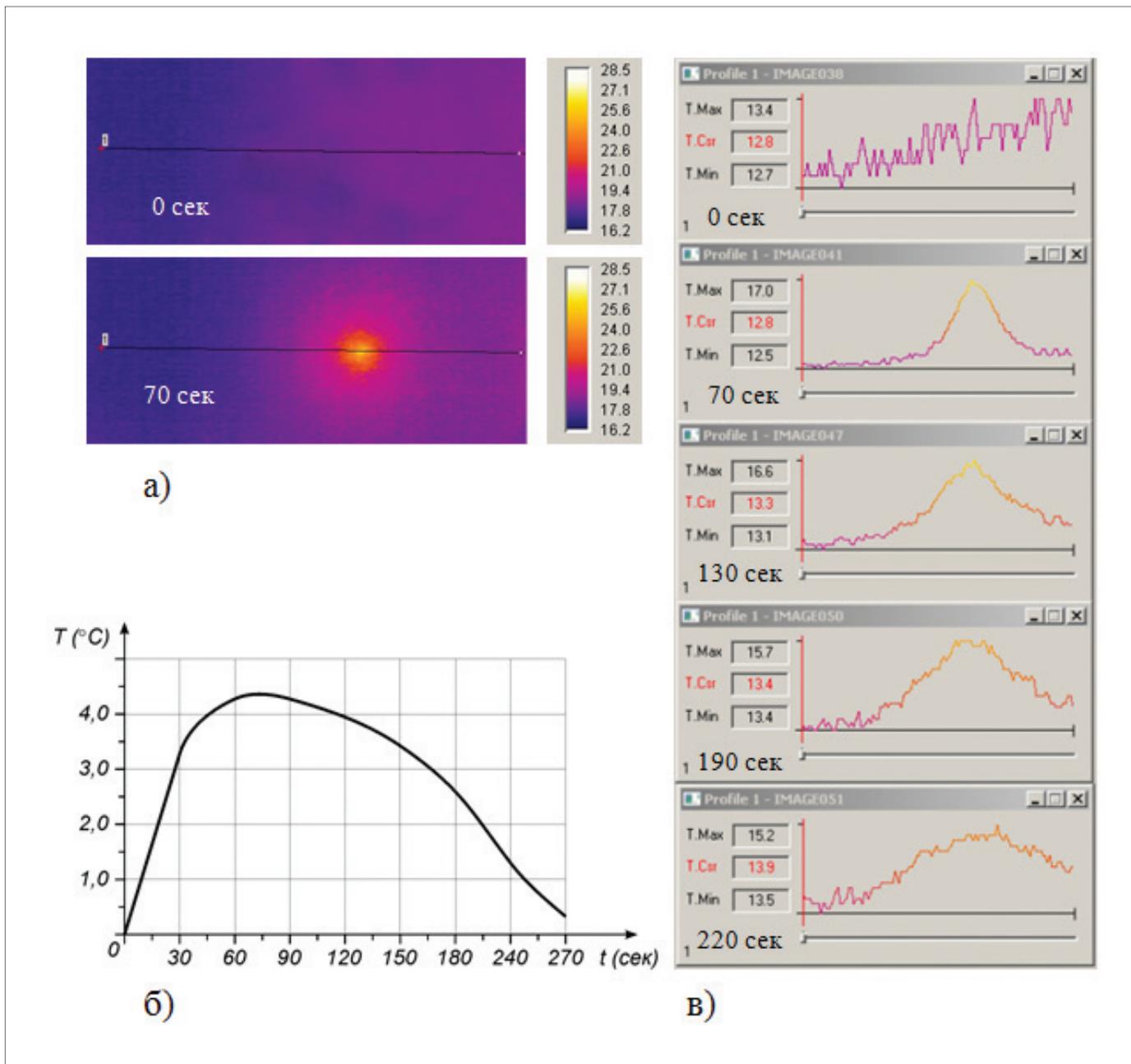


Рис. 4. Динамика термопроявления дефекта (Тип 1) в стальной пластине

теплопроводности, которая для стального образца достаточно велика.

На рис. 5 представлены термоизображения и графики, а на рис. 6 – динамика термопроявления дефекта (Тип 1) в стальной пластине (Сталь 35; толщина пластины – 2 мм; диаметр дефекта – 4 мм) при различных уровнях энергии активации образца циклическими напряжениями с частотой 22 кГц. На рис. 5 а) и соответственно на рис. 6 (кривая 1) – нагрузка на образец минимальная (0,1 МПа, мощность источника активации – 0,1 кВт). На рис. 5 б) и соответственно рис. 6 (кривая 2) – нагрузка на образец 0,35 МПа (мощность источника активации – 0,4 кВт) и на рис. 5 в) и соответственно рис. 6

(кривая 3) – нагрузка на образец 0,7 МПа (мощность источника активации – 0,9 кВт). В первом случае, когда мощность источника активации минимальна, по-видимому, в основном действует электрон-фононный механизм передачи энергии. В случае же увеличения нагрузки – преобладает действие механизма передачи энергии за счет упругой деформации кристаллической решетки.

Из графиков динамики роста амплитуды термопроявления дефектов видно, что с увеличением нагрузки на образец увеличивается амплитуда термопроявления дефекта, однако уменьшается интервал времени его термопроявления. Максимальная скорость

роста температуры наблюдается при максимальной нагрузке на образец. Максимальное термопроявление в этом случае наблюдается в интервале времени 50 – 100 с, превышение фоновой температуры при этом составляет примерно 2,7 °С. На 150 секунде действия нагрузки амплитуда термопроявления дефекта падает до уровня колебаний фоновой температуры. При еще более значительном увеличении нагрузки на образец интервал времени термопроявления дефекта выходит за пределы возможности его регистрации приемным оборудованием. Однако абсолютный максимум термопроявления дефекта (~3,4 °С) наблюдается во втором случае, когда

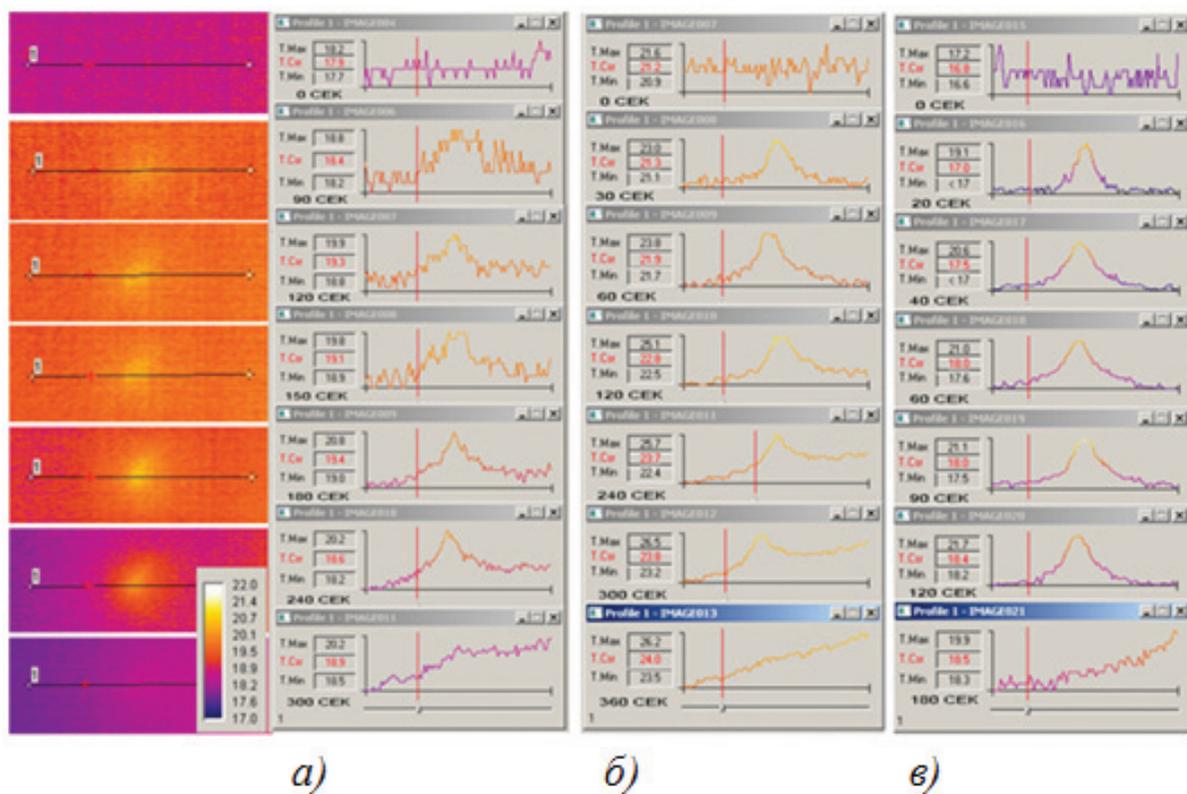


Рис. 5. Термоизображения и термограммы термопроявления дефекта (Тип 1) в стальной пластине при различных уровнях энергии активации образца циклическими напряжениями

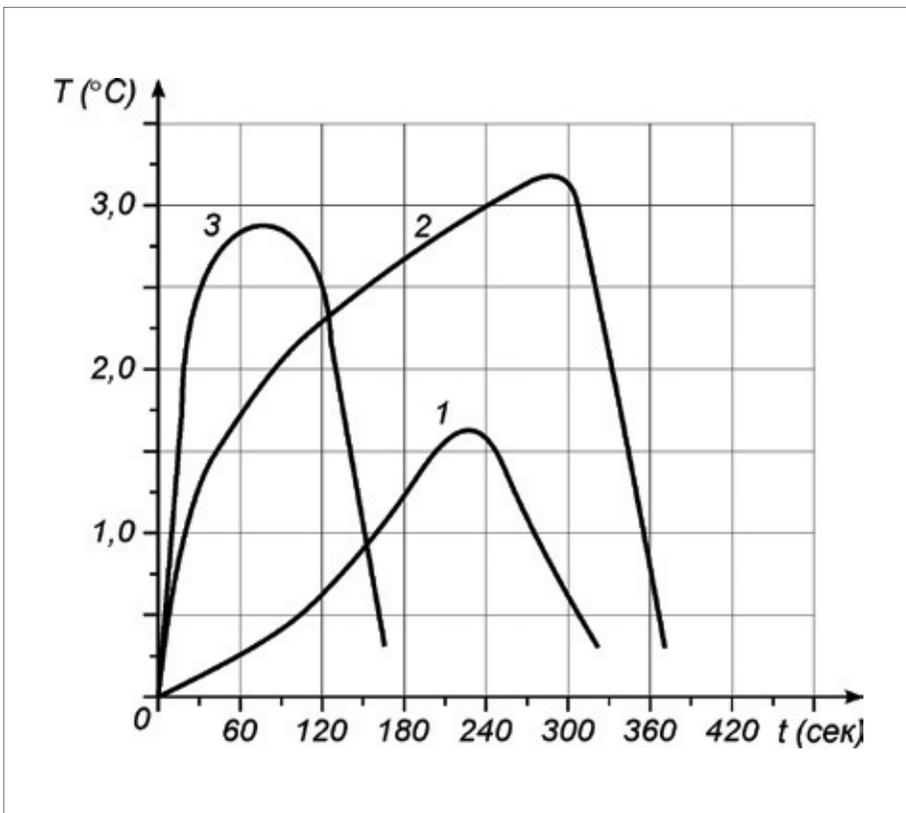


Рис.6. Динамика термопроявления дефектов (Тип 1) при различных уровнях энергии активации образца циклическими напряжениями (материал – Сталь 35; толщина пластины – 2 мм; диаметр дефекта – 4 мм): 1 – нагрузка на образец – 0,1 МПа, частота – 22 кГц; 2 – нагрузка на образец – 0,35 МПа, частота – 22 кГц; 3 – нагрузка на образец – 0,7 МПа, частота – 22 кГц

мощность источника активации составляет 0,4 кВт (амплитуда нагрузки – 0,35 МПа).

На рис. 7 представлены термоизображение и термограммы особенностей термопроявления дефектов Тип 2 в металле, имеющих разные теплофизические характеристики, при одновременном действии теплового (АЧТ, температура 220 °С) и акустического (частота – 22 кГц; мощность – 0,2 кВт; нагрузка – 0,05 МПа) источников активации. Данные приведены для 60 и 120 с времени термопроявления дефектов. Для этих времен термопроявление дефектов в данном случае является максимальным. Дефекты выполнены в виде запрессованных в пластину (Сталь 35, толщина 2 мм) цилиндров диаметром 5 мм (А – Сталь 20; В – минеральная смесь типа накипь; С – латунь; D – свинец; Е – реперное отверстие в металле). Максимальное значение термоаномалий достигало 0,7 °С, причем дефекты А, С и D проявились в виде отрицательных (относительно фоновой температуры образца) аномалий, с минимальным термопроявлением дефекта D (0,2 – 0,3 °С). На 180 секунде действия источников акти-

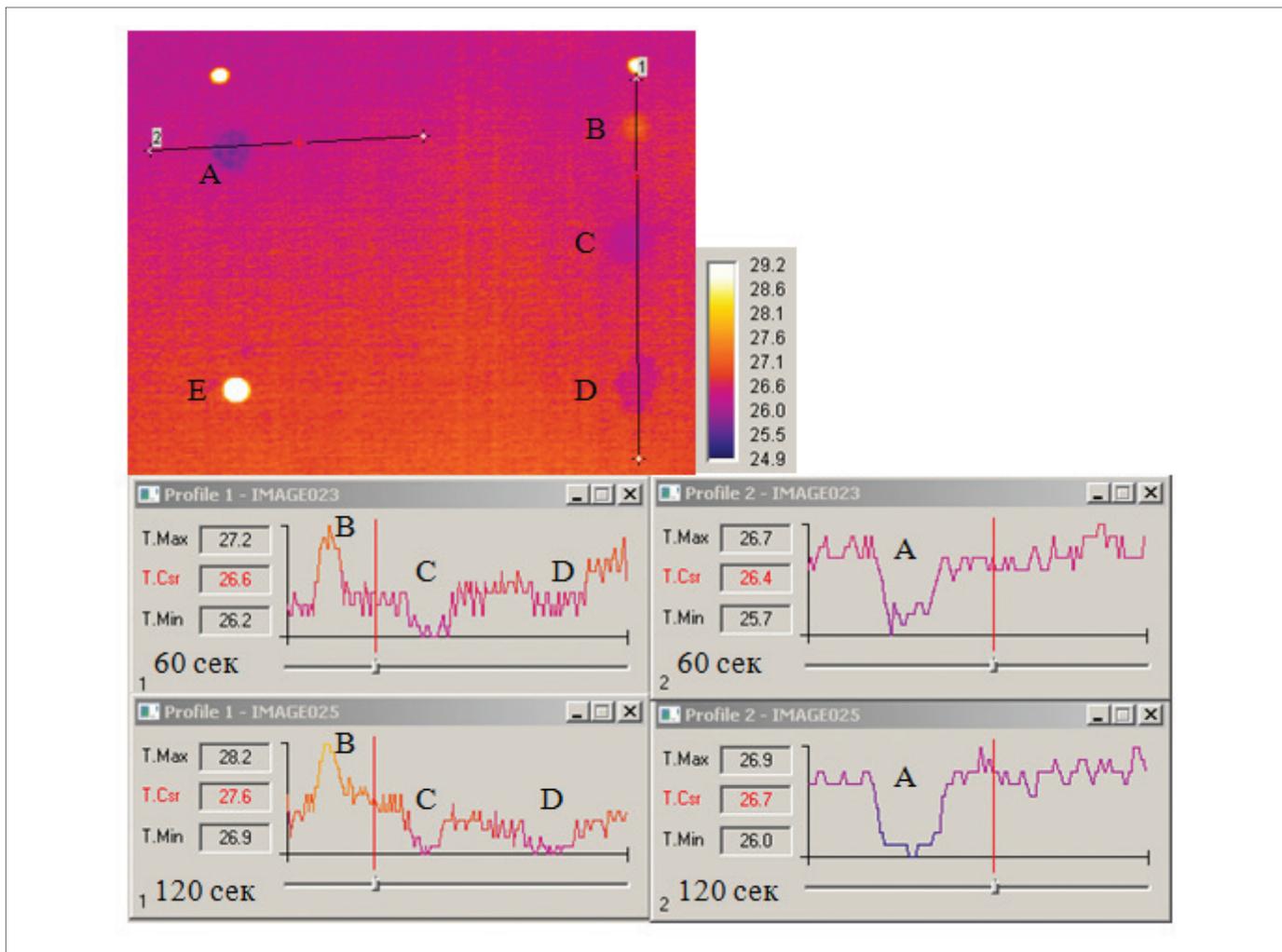


Рис. 7. Особенности термопроявления дефектов (Тип 2) в пластине металла при одновременном действии теплового (АЧТ) и акустического источников активации

вазии амплитуда термопроявления дефектов уменьшилась до уровня флуктуаций фона – образец перешел в изотермический режим.

При одновременной тепловой и акустической активации образцов подтвержден синергетический эффект термопроявления дефектов, что значительно повышает чувствительность метода к обнаружению микроструктурных неоднородностей в металлах.

Работа выполнена при частичной поддержке целевой комплексной программы НАН Украины «Ресурс», проект № 4.10.

Выводы

1. Разработан комплекс стенового оборудования и методология его использования с учетом возможности активации образцов тепловыми и акустическими полями, циклическими нагрузками. Данный комплекс может быть использован для активной термографической инфракрасной дефектоскопии и структурных

исследований конструкционных материалов.

2. Экспериментальные исследования подтвердили возможность выявления современными тепловизионными средствами контроля термопроявления структурных неоднородностей и дефектов в металлах при циклических нагрузках образцов.

3. Сочетание одновременной тепловой и акустической активации образцов значительно повышает чувствительность метода к обнаружению микроструктурных неоднородностей в металлах.

Список литературы:

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Mignogna R. B. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials / R. B. Mignogna, R. E. Green, J. Duke, E. G. Henneke, K. L. Reifsnider // *Ultrasonics*. – 1981. – V.7. – P. 159 – 163.

3. Maldague X. Pulsed phase infrared thermography / Maldague X., Marinetty S. // *J. Appl. Phys.* – 1996. – V.79 (5). – P. 2694 – 2697.

4. Han X. Thermosonics: Detecting cracks and adhesion defects using ultrasonic excitation and infrared imaging / X. Han, L.D. Favro, Z. Ouyang, R.L. Thomas // *The Journal of Adhesion*. – 2001. – V.76(2). – P. 151 – 162.

5. Morbidini M. Prediction of the thermosonics signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements / M. Morbidini, P. Cawley, T. Barden, D. Almond, Ph. Duffour // *J. Appl. Physics*. – 2006. – V.100. – P. 104905 – 104919.

6. Базалеев М. І. Установка активации металів циклічними напруженнями при термографічній дефектоскопії / М. І. Базалеев, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецький, В. Ф. Кленіков, В. В. Лутвищенко, Є. М. Прохоренко // *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. – 2013. – №5/5(65). – С. 36 – 40.