

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ПОВЕРХНЕВА ТЕМПЕРАТУРНА ДІАГНОСТИКА ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОТРИЩИН У НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛАХ

SURFACE TEMPERATURE DIAGNOSIS OF CRACKS ORIGIN IN THE STRENGTH-DEFORMED METALS

*Прохоренко С. В., д-р техн. наук, доц., Яцишин С. П., д-р техн. наук, проф.
Національний університет "Львівська політехніка", Україна
Габльовська Н. Я., канд. техн. наук, доц., Кононенко М. А., канд. техн. наук, доц.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна
e-mail: nadiiagablovska@gmail.com*

*Serhiy Prohorenko, Dr. Sc., As.-Prof., Svyatoslav Yatsyshyn, Dr. Sc., Prof.
Lviv Polytechnic National University, Ukraine
Nadiia Hablovska, PhD, As.-Prof., ²Maryna Kononenko, PhD, As.-Prof.
Ivano-Frankivskyi National Technical University of Oil and Gas, Ukraine*

<https://doi.org/10.23939/istcm2019.03>.

Анотація. Проаналізовано результати теоретичних досліджень про відповідність числового значення критичної густини внутрішньої енергії значенню ентальпії плавлення та структурно-енергетичну аналогію між процесами механічного руйнування і плавлення. Фізичну картину поширення температурного поля, утвореного у момент зародження дефекту, розглянуто за припущення попередньо бездефектного досліджуваного об'єкта та того, що перерозподіл температури в об'ємі та на поверхні відбувається рівномірно. Здійснено аналітично-числове опрацювання надходження фронту теплової хвилі, яку створює елементарний дефект, який зростає, залежно від глибини його залягання. Отримані результати експериментальних досліджень за допомогою створеної системи контролю дали змогу наблизитись до прогнозування глибини залягання мікрodefекту, що виникає внаслідок пластичної деформації. Виконані розрахунки опрацьовано та практично апробовано з розрахунку на подальше використання із системою зовнішнього імпульсного безконтактного контрольованого конвекційного енергетичного збурення.

Ключові слова: температурна діагностика, мікротріщина, напружено-деформований метал, моделювання.

Abstract. The results of theoretical studies on the correspondence of the numerical value of the critical density of internal energy to the value of the enthalpy of melting and the structural-energy analogy between the processes of mechanical destruction and melting are analyzed. The physical picture of the distribution of temperature field formed at the time of the birth defect, assuming considered previously investigated defect-free matter and assuming that the temperature redistribution in volume and at the surface is uniform. Analytical and numerical analysis of the heat wavefront arrival created by the growing elemental defect depending on its depth is carried out. The obtained results of the experimental researches with the help of the created control system allowed us to approach the question of prediction of the depth of occurrence of micro defects arising as result of plastic deformation. The calculations have been worked out and practically tested for future applications with the system of external impulse contactless convection perturbation.

As a result of studying the temperature-time dependences of the temperature distribution on opposite surfaces of the object of study, and depending on the depth of occurrence of the source of energy changes, the possibility of determining the location of the defect was experimentally determined, provided that the temperature sensors were located in the micro defects zone. For the creation of model quasi-point heating of a real research object corresponding to the model object, a non-contact "quasi-point" heat-convection type heater was developed with the ability to form a temperature difference – up to 100 K/mm. The results of the researches are the basis for the improvement of the existing system of control of the development of microcracks in stress-deformed metal structures.

Key words: Temperature diagnostics, Microcrack, Stress-strain metal, Modeling.

Вступ

Механічне руйнування конструкцій можна визначити як будь-які зміни розмірів, форми та властивостей матеріалу конструкції чи окремої її деталі, унаслідок яких вона втрачає здатність задовільно виконувати наперед задані функції. Для описання процесу руйнування застосовують різні підходи та теорії. Оскільки руйнування пов'язане із

утворенням нових поверхонь, під час розрахунків, пов'язаних з руйнуванням, ураховується поверхнева енергія. У 70-ті роки минулого століття сформувався новий підхід до руйнування тіл – кінетичний, за яким сповна враховується тепловий рух атомів і молекул. Для кількісної оцінки реакції тіл на механічну дію поряд із поняттям про границю пружності та плинності введено поняття про міцність як характеристику деякого граничного, критичного стану

навантаженого тіла. Механічний підхід до проблеми руйнування зберігся і надалі, коли тверде тіло почали розглядати як конструкцію із атомів, пов'язаних силою зчеплення. Розрив міжатомних зв'язків, за кінетичною концепцією міцності, спричинений фактичними тепловими флуктуаціями, а не дією напруження. Але роль механічного напруження в кінетичній системі надзвичайно велика.

За кінетичною теорією, безпосереднім руйнівним фактором є теплові флуктуації. Енергія руйнування черпається, великою мірою, з накопиченої теплової енергії тіла, а не тільки з роботи зовнішніх сил. Зовнішня сила відіграє роль вентилі, полегшуючи і спрямовуючи теплові флуктуації. Висновок про вирішальну роль теплових флуктуацій у механічному руйнуванні – це основне у пізнавальному значенні праць з вивчення кінетичної природи руйнувань.

Оскільки під час дії будь-яких навантажень на елемент металевої конструкції в структурі металу відбуваються фізико-механічні та хімічні зміни, перебудова структури металу супроводжується енергетичними змінами, які, внаслідок дисипації енергії, переходять у теплову. Застосовуючи термодинамічну теорію руйнувань, довели, що як інформативні параметри для визначення переддефектного стану можна застосовувати зміну енергетичних характеристик.

Урахувати дію мікроструктурних дефектів можливо через визначений мікророзподіл температурних коефіцієнтів лінійного розширення. У полікомпонентних твердих тіл внаслідок існування спектра таких коефіцієнтів будь-які зміни температури призводять до виникнення термоструктурних напружень. Аналіз фактичного технічного стану металевої конструкції протягом експлуатації за оціненими значеннями енергетичних характеристик, залежно від прикладеного навантаження, дає змогу визначати зміну ступеня працездатності та уможлиблює прогнозування її робочого ресурсу.

Енергетичне підґрунтя процесу еволюції дефектів розтягу досліджено у працях [2]. Показано, що дефект живиться енергією від роботи зовнішніх сил, прикладених до матеріалу. Зі збільшенням механічного навантаження (рис. 1) локальна температура дефектів зростала, а додаткове розігрівання сприяло локальному видовженню зразків. Інакше кажучи, механічні навантаження не були безпосередньою причиною деформації, а лише зумовлювали її через згадане мікророзігрівання матеріалу. Про це свідчить вивчення локальних температур дефектів розтягу. Вони виявились однаковими (950 K) у момент розриву під різним навантаженням, що становило вагомий аргумент на користь визначальної ролі мікроконцентраторів напружень.

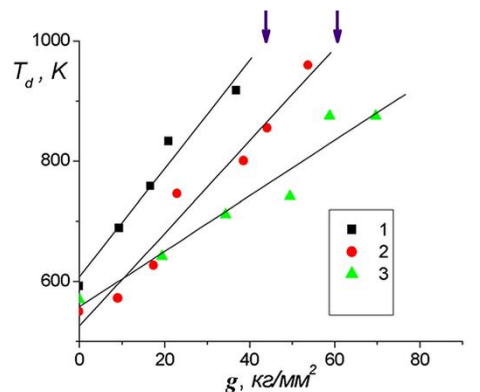


Рис. 1. Залежність локальної температури дефектів розтягу T_d поліпропілену різної довготривалої міцності: 1 – 40 кг/мм²; 2 – 60 кг/мм²; 3 – 110 кг/мм² (за 300 K) від зовнішніх механічних напружень g (стрілки – момент розриву) [1]

Fig. 1. Dependence of local temperature T_d of defects of tensile strength of polypropylene of different long-term strength g : 1 – 40 kg/mm²; 2 – 60 kg/mm²; 3 – 110 kg/mm² (at 300 K) on the external mechanical stresses (arrows mark the break moment) [1]

Проте природа процесів, що призводять до руйнування тіла, не досліджувалась, позаяк на той час не були розвинені інструментальні мікро- та нанотехнологічні методи досліджень.

Мета роботи

Мета цієї роботи – подальший розвиток системи контролю ідентифікації та розвитку мікротріщин на основі вивчення температурно-часових залежностей температурного розподілу в разі “квазіточкового” нагрівання напружено-деформованих металевих конструкцій.

Вивчення впливу температури на довговічність зразків

Для з'ясування природи процесів, що призводять до руйнування тіла, досліджено вплив температури на довговічність матеріалу, що перебуває під дією навантаження. Експериментальні залежності між довговічністю t , діючим напруженням σ_r і абсолютною температурою T дали змогу встановити аналітичні співвідношення між цими величинами. Довговічність твердих тіл можна описати так:

$$t = t_0 \cdot \exp(U(g)/k \cdot T), \quad (1)$$

де $U(s) = U_0 - g \cdot g$; k – стала Больцмана. Всі наступні висновки про природу руйнування твердих тіл випливають з аналізу виразу (1), який є основним рівнянням довговічності.

Із термодинамічних теорій руйнування, що ґрунтуються на густині енергії деформації, яку

визначають на основі термодинамічних констант, найпоширеніша ергодинамічна теорія, яка дає змогу розраховувати поля пошкоджень твердого тіла, що деформується, визначати градієнти пошкоженості. Результати дослідження руйнування металів і сплавів на основі ергодинамічної теорії міцності із використанням термодинамічного критерія руйнувань – густини внутрішньої енергії наведено в [2]. Вказано, що відповідність числового значення критичної густини внутрішньої енергії значенню ентальпії плавлення підтверджує, що локальні об'єми, які відповідають за руйнування, перебувають у квазіаморфному стані, а між процесами механічного руйнування і плавлення існує структурно-енергетична аналогія.

Основним параметром, який необхідно контролювати за допомогою відомих методів, є момент переходу металу із переддефектного у дефектний стан, тобто утворення мікроефекту та енергетичні зміни, що спостерігаються протягом структурних перетворень, а також виникнення несущальностей у металі конструкції.

Відомо, що руйнування металів та їх сплавів зі зміною структурних рівнів супроводжується трансформацією внутрішньої енергії, яка врешті перетворюється на теплову, а це супроводжується зміною температури в зоні утворення дефекту. Вищенаведене дає змогу визначити температурний розподіл у структурі металу, що перебуває під дією навантажень, у момент утворення мікроефекту. Процес передавання тепла від зони зародження мікроефекту (від місця його виникнення) відбувається за допомогою теплопровідності.

На цьому етапі аналізують можливість розв'язання задачі реєстрації енергії джерела тепла і його положення у певному обмеженому об'ємі. Така задача називається оберненою задачею теплопровідності. В теорії диференціальних рівнянь така обернена задача є некоректною, і її розв'язок в аналітичному вигляді отримати неможливо. Для одержання наближеного розв'язку необхідно визначити точний розподіл температури на поверхнях зразка і її часову зміну. Виділення тепла в момент утворення дефекту є практично миттєвим явищем. Тому надалі можна вважати, що перерозподіл температури у об'ємі та на поверхні відбувається рівномірно. Це призводить до дещо спрощеного розгляду фізичної картини температурного поля.

Якщо припустити, що у досліджуваному зразку є дефекти (тріщини, каверни), які також впливають на розподіл температури, то розв'язок такої задачі міститиме відхилення від реальної картини. Це пов'язано із ефектом екранування на вільних поверхнях. Розрахований тепловий ефект утвореного дефекту як джерела теплоти міститиме завищені значення, а це призведе до завищеного розміру утвореного дефекту. Тому в наших мірку-

ваннях вважатимемо, що досліджуваний об'єкт був бездефектним у попередні моменти часу.

Розглядаючи термодинамічну модель [1], в основу якої покладено рівняння теплопровідності, у такому вигляді:

$$\operatorname{div}[a \cdot \operatorname{grad}(T)] + q_v / cr = \partial T / \partial t \quad (2)$$

та враховуючи, що стан об'єкта, який перебуває під дією навантаження, характеризується динамічними процесами утворення і анігіляції різно-рідних дефектів, неможливо нехтувати взаємодією дефектів. Тому кількість тепла, що виділяється під час перебудови останніх, доволі значна.

Дослідження дефектної мікроструктури металу [3] показує, що у разі пластичної деформації утворюються мікротріщини, поблизу яких спостерігається максимальне накопичення точкових дефектів, концентрація яких зменшується залежно від відстані до мікротріщини. Для математичних розрахунків доцільно припустити, що поширення тепла від джерела енергії можна описати за допомогою гауссівського розподілу. Рівняння для визначення кількості тепла має вигляд [4]:

$$Q(\mathbf{r}) = (2/ps)^{3/2} \cdot P \cdot \exp(-2|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|/s), \quad (3)$$

де P – потужність джерела тепла; s – середнє квадратичне відхилення; \mathbf{r}_0 – положення джерела теплової енергії.

Наведену термодинамічну модель покладено в основу розробленої системи контролю розвитку мікроефектів у металевих конструкціях, що перебувають під дією навантаження. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що інформативним параметром, який характеризує момент зародження тріщини, є стрибкоподібна зміна температури [4]. Результати експериментальних досліджень, отримані за допомогою створеної системи контролю, дали змогу наблизитись до прогнозування глибини залягання мікроефекту [5]. Вдосконалено термодинамічну модель та одержано температурні розподіли від джерела тепла на двох протилежних поверхнях змодельованого зразка, з центрами, що розташовані на одній вісі. Це дало змогу, враховуючи часовий розподіл та часову кореляцію зміни температури, наблизитись до розрахунку розмірів та місця розташування утвореного дефекту.

Для визначення температурного розподілу змодельовано зразок у формі паралелепіпеда розмірами $5 \times 1,5 \times 0,8$ мм³ з фізико-механічними властивостями конструкційної сталі Ст20. Для розв'язання рівняння теплопровідності (1) визначено відповідні початкові та крайові умови [6].

Припускаємо, що до моменту навантаження у зразку встановлено рівномірний розподіл температур, а два його протилежні кінці перебувають за сталої температури 15°C. Отже, крайові умови такі:

$$T(x, 5, z, t) = T(x, -5, z, t) = 15. \quad (4)$$

За відомого масштабного рівня мікродефекту, який становить 10–200 мкм, кількість тепла, що виділяється під час його утворення, дорівнює 36–40 Дж. Дія джерела, яке створює цей тепловий ефект, короткочасна. Це дало змогу отримати температурні розподіли на паралельних поверхнях зразка залежно від глибини залягання джерела енергетичної зміни (рис. 2, а, б).

Розрахунок виконали в середовищі програмного пакета Flex PDE v.9 компанії PDE Solution Inc., використовуючи методику, подану в [7]. Моделювання температурного розподілу здійснено для випадку, коли мікротріщина, яка утворюється в результаті деформації, виникає по осі симетрії зразка. Щоб одержати інформативні результати температурного вимірювання, термодавачі необхідно розташовувати по обидва боки досліджуваного зразка – це дає змогу отримати інформацію про температуру поверхні зразка у центральних симетричних точках. У модельному експерименті дефект (мікротріщина) виникає поміж термодавачами. Отже, вони фіксують найвищу температуру поверхонь. Змінюючи координати джерела енергетичних змін вздовж центральної вісі, отримали різні температурні розподіли на площинах протилежних граней змодельованого зразка.

Ця відмінність показує, що у випадку утворення дефекту на глибині, відмінній від $1/2$ товщини зразка, по його центральній вісі виникає часова затримка спостереження максимуму температури на протилежних поверхнях об'єкта дослідження. Швидкість поширення теплової хвилі в результаті нагрівання точковим джерелом у металі визначається як

$$w = \sqrt{e/t_p},$$

де $e = 1/cr = 3,7 \cdot 10^{-11}$ – коефіцієнт температуропровідності (I – коефіцієнт теплопровідності). Час затримки між значеннями максимальних температур на верхній та нижній поверхнях залежно від координати z та товщини зразка d набуває вигляду: $\Delta t = (d/2 + z)/w - (d/2 - z)/w = 2z/w$, де w – швидкість поширення теплової хвилі в результаті нагрівання точковим джерелом у металі; d – товщина змодельованого зразка; z – відстань від верхньої та нижньої поверхонь до початку координат.

Одержано максимальне значення температури на поверхні T_{\max} та різниці температур ΔT_{\max} на верхній та нижній поверхнях, залежно від координати (глибини залягання) мікродефекту z .

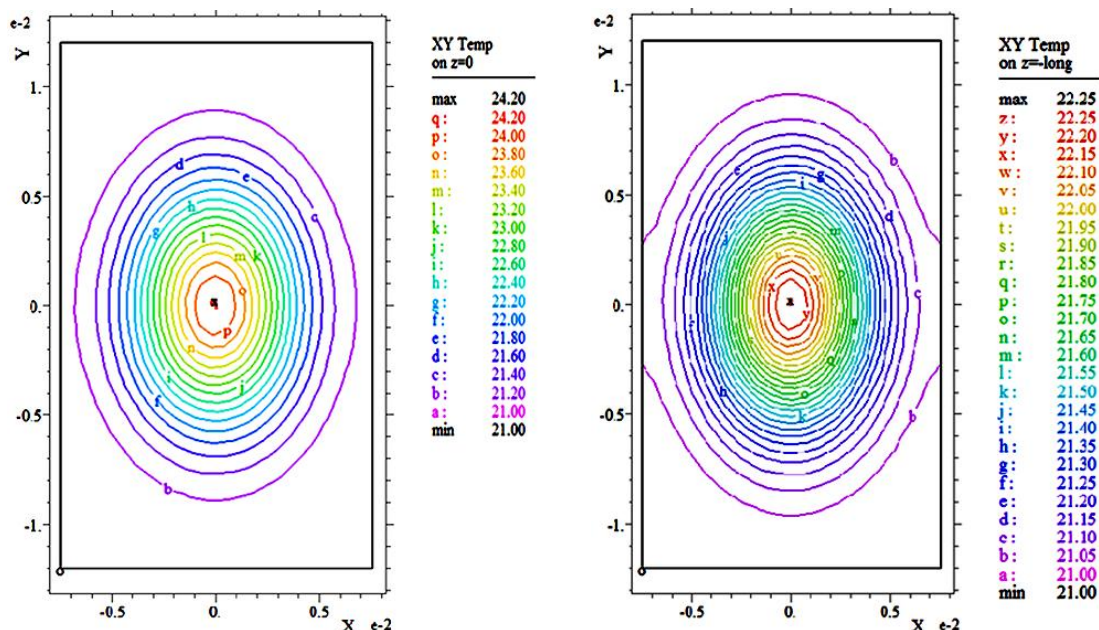


Рис. 2. Моделювання температурного розподілу на паралельних поверхнях зразка залежно від глибини (z) залягання джерела енергетичної зміни, якщо утворена унаслідок деформації мікротріщина виникає по осі симетрії зразка

Fig. 2. Modeling of temperature distribution on parallel surfaces of the sample depending on the depth (z) of occurrence the source of energy change – for the case, when the microcrack resulting from deformation arises along the axis of symmetry of the sample

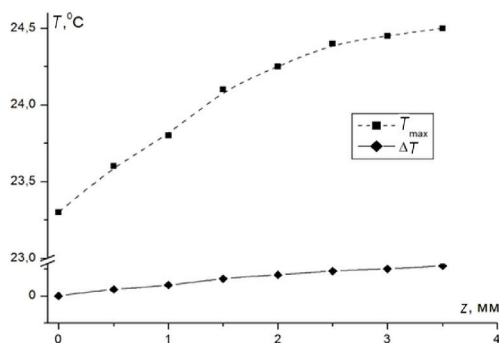


Рис. 3. Залежності температури T_{\max} , різниці температур DT_{\max} та часу затримки Dt від координати мікроефекту z

Fig. 3. Temperature T_{\max} , temperatures difference DT_{\max} and delay time Dt on microdefect coordinate z dependences

Результати виконаних розрахунків опрацьовані та практично апробовані для подальшого спільного використання із підсистемою зовнішнього безконтактного контрольованого енергетичного збудження [8], яка застосовується у режимі опрацьовуваної пневмо-Lock-in діагностики.

Залежність температурно-часових розподілів по поверхні моделі залежно від координати z мікроефекту Temperature-time surface distributions of the model depending on the microdefect coordinate z dependence

z , мм	T_{\max} , °C	DT_{\max} , °C	Dt , с
0,0	23,30	0,00	0,000
0,5	23,60	0,60	0,007
1,0	23,80	1,00	0,021
1,5	24,10	1,60	0,031
2,0	24,25	1,95	0,065
2,5	24,40	2,30	0,092
3,0	24,45	2,50	0,150
3,5	24,50	2,80	0,206

Висновки

1. У результаті вивчення температурно-часових залежностей температурного розподілу на протилежних поверхнях об'єкта досліджень, причому залежно від глибини залягання джерела енергетичних змін, експериментально доведено можливість визначення місця розташування дефекту за умови розташування сенсорів температури в зоні мікроефекту.

2. Для створення модельних квазіточкових нагрівачів реального об'єкта досліджень, що відповідає модельному об'єкту, розроблено безконтактний "квазіточковий" нагрівач теплоконвекційного типу [8] зі здатністю формування перепаду температури до 100 К/мм.

3. Результати досліджень покладено в основу вдосконалення системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металевих конструкціях.

Подяка

Автори висловлюють глибоку вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Львівська політехніка" за допомогу в підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Конфлікт інтересів під час написання, підготовки та опублікування статті відсутній.

Література

- [1] Н. Габльовська, Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях: автореф. дис. канд. техн. наук, Івано-Франківськ, Україна: Факел, 2008.
- [2] S. Fedorov, "Energy Balance of Friction and Friction Coefficient in Energetical Interpretation", *Tribology in Industry*, vol. 37. no. 3, pp. 380–389, 2005.
- [3] І. Грабар, *Термоактиваційний аналіз та синергетика руйнування*, Житомир, Україна: ЖІТІ, 2002.
- [4] І. Болеста, *Фізика твердого тіла*, Львів, Україна: Вид. центр ЛНУ ім. І.Франка, 2003.
- [5] Н. Габльовська, М. Кононенко, Т. Луцишин, Д. Румежак, "До питання можливості виявлення глибини залягання мікроефекту при двосторонньому доступі до зони контролю елементів металевих конструкцій, що перебувають під дією навантажень", *Система обробки інформації*, Харків, Україна, вип. 6 (131), с. 32–35, 2015.
- [7] I. Zakirova, N. Chichirova, "Mathematical simulation of the thermal processes in the heating networks insulation using thin-film covering", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 288. 012128, 2019.
- [8] M. Wozny, K. Mas, S. Prokhorenko, P. Dariusz, E. Sheregii, "Infrared Radiation Emitted due to Scanning of a Hot Spot as a Probe of Hidden Defects", *Infrared Physics & Technology*, iss. 76, pp. 574–579, 2016.

References

- [1] N. Gablovska, Control system for the development of microcracks in stress-strain metal structures, PhD thesis, Ivano-Frankivsk, Ukraine: Torch, 2008.
- [2] S. Fedorov, "Energy Balance of Friction and Friction Coefficient in Energetical Interpretation", *Tribology in Industry*, vol. 37. no. 3, pp. 380–389, 2005.
- [3] I. Grabar, *Thermoactivation Analysis and Synergetics of Destruction*, Zhytomyr, Ukraine: ZhITI, 2002.
- [4] I. Bolesta, *Solid State Physics*, Lviv, Ukraine: Publ. Center of LNU named after I. Franco, 2003.
- [5] N. Gablovska, M. Kononenko, T. Lutsyshyn, D. Rumezhak, "On the Possibility of Detecting the Depth of Microdefect in Two-Way Access to the Area of Control of Elements of Metallic Structures Under Load Load", *Information Processing System*, Kharkiv, Ukraine, vol. 6 (131), pp. 32–35, 2015.
- [7] I. Zakirova, N. Chichirova, "Mathematical simulation of the thermal processes in the heating networks insulation using thin-film covering", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 288. 012128, 2019.
- [8] M. Wozny, K. Mas, S. Prokhorenko, P. Dariusz, E. Sheregii, "Infrared Radiation Emitted due to Scanning of a Hot Spot as a Probe of Hidden Defects", *Infrared Physics & Technology*, iss. 76, pp. 574–579, 2016.