

УДК 629.7

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА, ПОВРЕЖДЁННОГО СЕТКОЙ ТРЕЩИН ТЕРМОУСТАЛОСТИ

И. В. Коноваленко, П. О. Марущак

*Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя,
46001, Украина, г. Тернополь, ул. Русская, 56
E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com*

Предложен метод анализа кинетики процесса разрушения образца с множественными дефектами путём расчёта функции изменения гистограммы изображения трещин. На основании обработки фотоизображений поверхности с множественными дефектами, полученных на различных стадиях деформирования исследуемого темплетта, разработана методика автоматизированной идентификации зоны локализации дефектов. Экспериментально подтверждено, что данный метод может использоваться для выявления трещин, направление которых совпадает с одной из осей изображения.

Ключевые слова: изображение, идентификация трещин, множественное растрескивание, деформационное поведение.

Введение. Методы цифрового анализа позволяют получить количественную информацию об объекте и обеспечить оценку его технического состояния. Это особенно важно для металлургического оборудования, в частности для роликов машин непрерывного литья заготовок, где неожиданные остановки не допускаются технологией производства, а время эксплуатации конструкции с трещинами составляет до 80 % общего ресурса [1].

Одним из наиболее перспективных направлений развития методов цифровой диагностики является физическая мезомеханика, согласно положениям которой разломная зона — это участок стадийно развивающейся деформационной сингулярности [2, 3]. Изменение деформационного поведения приводит к формированию упорядоченной структуры разломно-блоковой зоны и может приостановиться на любой из предыдущих стадий или активизироваться в результате перераспределения деформаций [4]. Методы цифровой диагностики позволяют определять количественные признаки данных процессов в зависимости от интенсивности деформирования, формирования разломов и их смещения [5]. Деформационное взаимодействие зон разориентированных разломов, сформированных в результате коалесценции трещиноподобных дефектов, обуславливает их ротационное смещение. Интенсификация деформационных смещений является дополнительным диагностическим признаком локализации структуры множественных дефектов и перехода процесса разрушения на более высокий масштабный уровень [6].

Существующие критерии идентификации множественных дефектов базируются преимущественно на учёте их морфологических признаков и отдельных механизмов коалесценции [7, 8]. Выделение дефектов основывается на определении контура объекта с интерполяцией между точками идентификации. При этом выявляются дефекты различных размеров и конфигураций, отдельные участки которых имеют квазиупорядоченный характер [9, 10]. Однако у такого подхода есть ряд недостатков, главный из них — невозможность оценки эволюции существующей сети дефектов. По нашему мнению, цифровая диагностика подобных процессов требует развития структурно-ориентированного подхода

на основе механики и цифровых методов идентификации, направленных на обнаружение зон разломов, оценки их строения и кинетики развития [11, 12].

Цель предлагаемой работы — выявить основные закономерности кинетики старта микродефектов в разломно-блоковой среде и создать автоматизированный метод идентификации участков повышенной структурно-морфологической активности.

Методика исследований. В данной работе применялись призматические образцы шириной $b = 40$ мм и толщиной $t = 10$ мм, высота темплета составляла $L = 50$ мм. Испытания проводились в условиях одноосного растяжения на гидравлической машине ZD 100Pч (рис. 1). Для измерения осевой деформации образцов использовался метод тензометрии с точностью измерения деформаций до 10^{-3} мм. Проводились цифровая фото-съемка поверхности нагруженного образца и последующий автоматизированный анализ геометрии растрескивания с помощью программного комплекса "Crack Analyzer" [6]. Результат программного анализа содержит совокупность количественных параметров, характеризующих состояние поверхности исследуемого образца.

Деформация материала вследствие пластического течения матрицы и раскрытия множественных дефектов может быть охарактеризована следующим образом [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{\text{int}} + \sum_{i=1}^p \delta_i/L, \quad (1)$$

где ε^{int} — деформация островков материала, расположенных между трещинами; δ_i — раскрытие i -й трещины; p — количество трещин в пределах исследуемого участка L .

Испытания проходили по схеме статического растяжения, в которой напряжённо-деформированное состояние материала образца было такое же, как в металле ролика машины непрерывного литья заготовок при эксплуатационном нагружении.

Результаты экспериментов. Развитие процесса множественного разрушения на различных масштабных уровнях требует выявления и формулировки единых закономерностей накопления и развития дефектов. С позиций системного подхода суть исследования заключается в попытке проведения анализа не только по двум формальным системообразующим факторам — размеру трещин и их положению в пространстве, но и с учётом структурно-иерархического строения материала.

Локализованное пластическое течение зарождается в зонах растягивающих нормальных напряжений, где материал находится в сильнонеравновесном состоянии. При этом описать природу локализации пластического течения можно только при рассмотрении деформируемого твёрдого тела в виде многоуровневой системы [2].

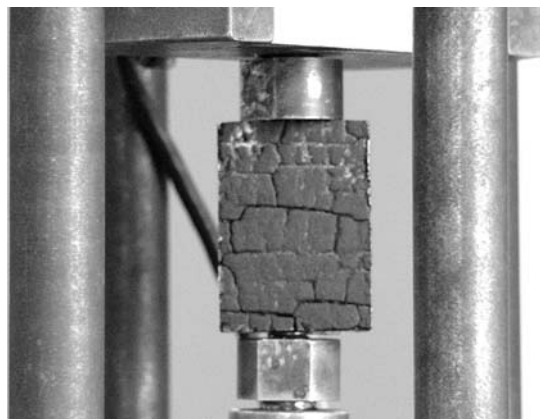


Рис. 1. Схема испытания образца с сеткой трещин термоусталости

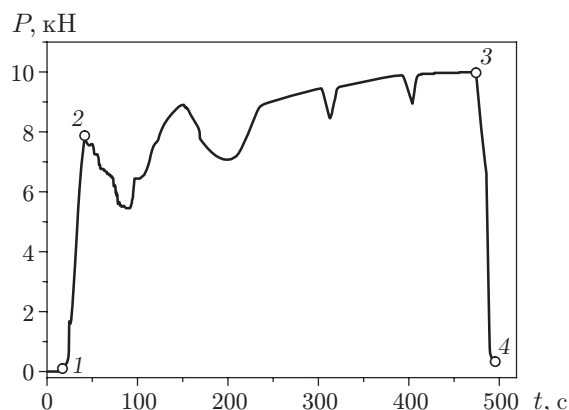


Рис. 2. Зависимость нагрузки образца P от времени деформирования t

Выделим ряд стадий процесса нагружения в зависимости от деформационно-силового поведения образца (рис. 2):

1–2. Участок упругого деформирования характеризуется микрооднородным деформированием преимущественно упругонагруженного материала.

2–3. Раскрытие наибольшего дефекта на фоне «стохастического поведения» второстепенных, меньших по размеру трещин. При этом раскрывается трещина, расположенная нормально к оси нагружения. Однако её дальнейшего распространения не наблюдается в связи с тем, что она окружена неповреждённым материалом, обладающим достаточным запасом прочности, а также из-за его высокой вязкости. Несмотря на её раскрытие и падение податливости образца, происходит перераспределение напряжений в материале и деформирование продолжается. Более того, вследствие значительных релаксационных процессов для дальнейшего деформирования материала следует приложить дополнительное усилие.

3–4. Разгрузка образца проводится для определения изменения податливости материала в процессе разрушения.

Алгоритм анализа изображений. Алгоритм анализа кинетики развития повреждённых образцов состоит из двух этапов (рис. 3). Первый, подготовительный этап предназначен для распознавания на изображении зон локализации трещин. Он состоит из последовательных операций выравнивания освещённости, фильтрации и бинаризации. На втором этапе путём анализа полученного изображения вычисляют количественные характеристики, которые позволяют оценить деформационное состояние образца и локализовать зону его максимального повреждения.

Выравнивание освещённости изображения предназначено для устранения влияния затенённых областей исходного изображения I на результат обнаружения трещин. Эта операция выполняется с помощью свёртки изображения с низкочастотным фильтром и последующего устранения низкочастотной составляющей. Для фильтрации используется гауссовский фильтр G с достаточно большим размером ядра, в результате чего получается приблизительное изображение освещённости $l'(i, j)$ (i — индекс строки изображения I , $i \in (1, \dots, n)$; j — индекс столбца, $j \in (1, \dots, m)$).

После этого изображение с выровненной освещённостью запишем в виде

$$I_L(i, j) = K_L \frac{I(i, j)}{l'(i, j)}, \quad (2)$$

где $K_L = \max(l'(i, j))$ — коэффициент выравнивания освещённости.

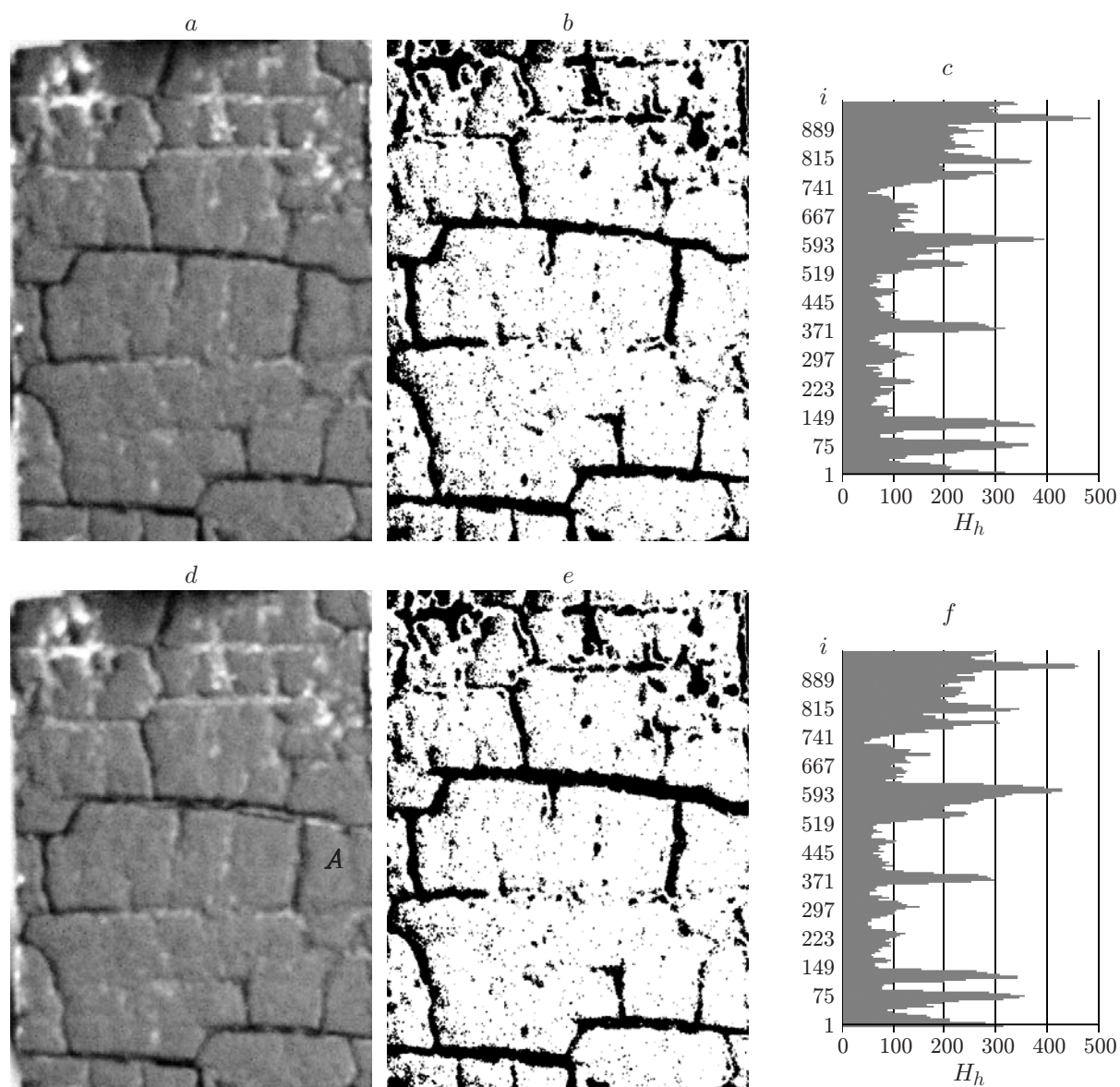


Рис. 3. Распознавание положения трещин: исходное цифровое изображение исследуемого образца (a), результат идентификации положения трещин (b), горизонтальная гистограмма (c) в свободном состоянии (см. рис. 2, точка 1) и при максимальной нагрузке (см. рис. 2, точка 3) (d—f)

Для устранения на полученном изображении мелких шумов, вызванных особенностями работы фотоматрицы, применялся медианный фильтр. В результате обработки получаем изображение I_F .

После предварительной обработки и повышения качества изображения проводили его сегментацию с целью выделения объектов — трещин. Специфика исследуемых изображений (рис. 3, a, d) такова, что на однородном фоне, соответствующем поверхности образца, находятся объекты (трещины). В зависимости от глубины и влияния коррозионной среды они могут быть темнее или светлее фона. Поэтому для их локализации на изображении использовано двухуровневое бинарное преобразование. При этом на гистограмме яркости изображения I_n (рис. 4) выделяли два уровня: B_{\min} и B_{\max} ($B_{\min} \in [0, 255]$, $B_{\max} \in [0, 255]$,

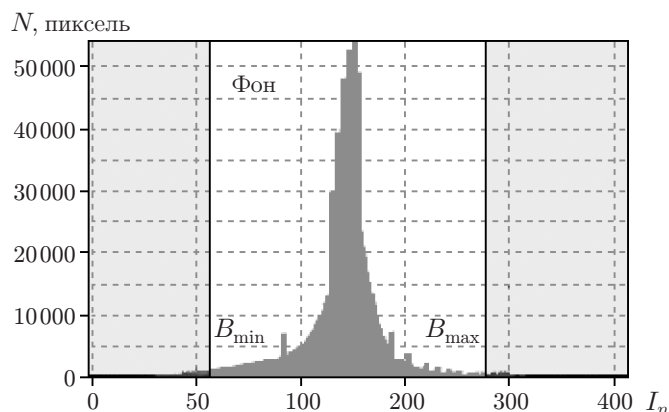


Рис. 4. Типичная гистограмма распределения яркости для исследованных изображений

где 0 и 255 — минимальное и максимальное возможные значения яркости пикселей соответственно), ограничивающих область фона. Каждая точка полученного изображения I_B определяется из условия

$$I_B(j, i) = \begin{cases} 1 & \text{при } I_F(j, i) > B_{\max} \text{ или } I_F(j, i) < B_{\min}, \\ 0 & \text{при } B_{\min} \leq I_F \leq B_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

На этом изображении фону соответствуют белые пиксели, а повреждённым участкам (трещинам) — чёрные (рис. 3, *b, e*).

В целях автоматизации оценки общего состояния повреждённой поверхности для каждого полученного после обработки изображения рассчитывали вертикальную H_v и горизонтальную H_h гистограммы:

$$H_v(j) = \sum_{i=1}^n I(i, j), \quad (4)$$

$$H_h(i) = \sum_{j=1}^m I(i, j). \quad (5)$$

Каждый элемент вертикальной и горизонтальной гистограмм содержит определённое количество ненулевых пикселей в столбцах и строках изображения. Гистограммы (4), (5) являются исходным базовым массивом данных, на основании которого оценивали степень растрескивания анализируемой поверхности вдоль координатных осей и определяли участки изображения, соответствующие повреждённым фрагментам поверхности. Горизонтальные гистограммы для опытного образца приведены на рис. 3, *c, f*.

Для оценки динамики разрушения опытного образца использовали функции изменения горизонтальной и вертикальной гистограмм:

$$D_h(t) = dH_h/dt = \Delta H_h/\Delta t, \quad (6)$$

$$D_v(t) = dH_v/dt = \Delta H_v/\Delta t. \quad (7)$$

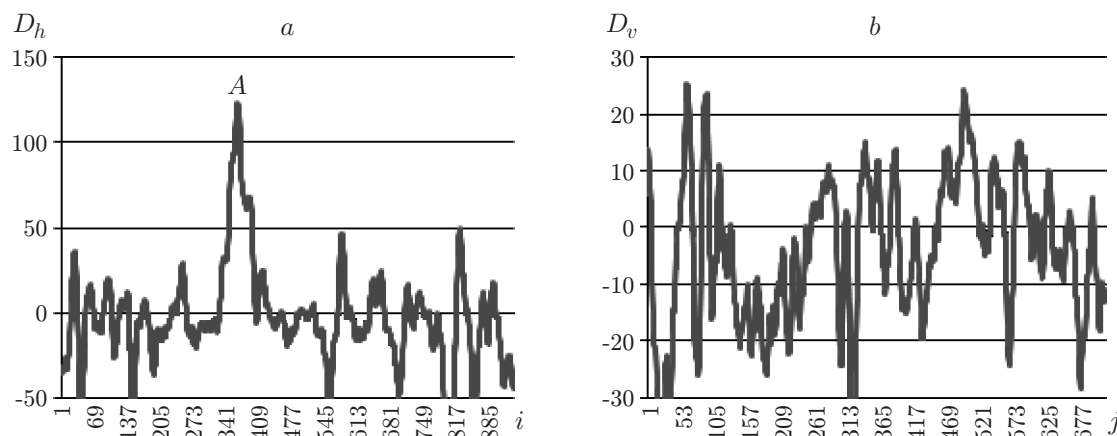


Рис. 5. Графики функций изменения гистограмм, соответствующих диапазону времени $\Delta t = t_1 t_3$: горизонтальной (а) и вертикальной (б)

На рис. 5, а показан график функции изменения горизонтальной гистограммы, соответствующий диапазону времени $\Delta t = t_1 t_3$ (см. рис. 2), на протяжении которого происходило разрушение исследуемого образца. На графике присутствуют ярко выраженные пики, относящиеся к зонам изображения, которые характеризуются накоплением (раскрытием) дефектов. При этом самый высокий пик (зона А) представляет поведение макродефекта (зона А на рис. 3, d). Видно, что максимальное значение этого пика в среднем на 170 % превышает экстремумы, соответствующие другим зонам опытного образца. Предложенный подход позволяет выявить зоны опытного образца с наибольшей интенсивностью дефектообразования.

На основании анализа графика функции изменения вертикальной гистограммы (рис. 5, б) выявлено, что амплитуда максимумов значительно меньше, ярко выраженные максимумы отсутствуют, а сам характер изменений является случайным. Это объясняется тем, что зоны образца, которые в наибольшей степени подвержены разрушению, имеют горизонтальную ориентацию [6].

Таким образом, результаты анализа функций D_h, D_v позволяют определить преобладающую ориентацию множественных дефектов, идентифицировать зоны максимального разрушения, а также оценить кинетику распространения множественных дефектов.

Из рис. 5, а видно, что функция изменения горизонтальной гистограммы содержит ряд отрицательных выбросов сравнительно высокой амплитуды. Главная причина их возникновения — смещение фрагментов изображения вследствие раскрытия трещины в зоне А (см. рис. 3, d). Кроме того, линейное и угловое смещение образца в течение деформирования, а также изменение параметров алгоритма распознавания трещин тоже приводят к появлению шумов в функциях изменения гистограмм.

Наличие таких шумов в определённой степени усложняет анализ изменения гистограммы и нахождение зон локализации разрушения, а также задаёт ограничения области применения предложенного метода. Методику можно использовать при значительных изменениях в виде трещин, когда амплитуда изменения функции гистограммы преобладает над амплитудой шумов. Влияние высокочастотных помех было устранено с помощью фильтрации Фурье. Опытным путём установлено, что для информативного анализа достаточно учитывать 7–10 нижних гармоник.

Обсуждение результатов. Деформационное поведение материала с множественными трещиноподобными дефектами определяется геометрическим и структурно-иерархическим факторами. Поэтому форма диаграммы объединяет участки как деформирования,

так и «срыва нагрузки», связанного с локализацией деформации в элементах разломно-блоковых структур множественного растрескивания [2]. Кроме того, различная глубина трещиноподобных дефектов приводит к неоднородности деформационного поведения и структурной перестройке материала. Старт трещины для такого материала вызывает релаксацию напряжений в прилегающих участках, при этом деформационные процессы локализуются в окрестности магистрального дефекта [12]. Это и позволяет реализовать предложенный алгоритм, который «отслеживает» деформационные сингулярности на поверхности. Идентификация участков активации ротационных смещений структур множественного растрескивания позволила выявить трещиноподобные дефекты и проанализировать их деформационное поведение. При этом высоко- и низкоамплитудные колебания соответствуют термоусталостным трещинам, а их комплексная конфигурация формирует зону повышенной деформационной активности [13].

Заключение. В данной работе предложена физико-механическая интерпретация стадийности процессов деформирования материала с множественными дефектами, которая обеспечивается согласованностью деформации материала и раскрытия дефектов. Учитывая разнородность свойств материала с трещинами по сечению образца, его можно рассматривать как разломно-блоковую среду, состоящую из разориентированных фрагментов материала, окружённых трещинами.

Разработан метод анализа кинетики процесса разрушения образца стали с множественными дефектами, который основан на расчёте функции изменения гистограммы изображения. В результате анализа фотоизображений, полученных на различных стадиях деформирования образца, предложена методика, позволяющая автоматически идентифицировать зоны наибольшего накопления дефектов поверхности. Методика может использоваться для обнаружения трещин, направление которых совпадает с одной из осей изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коноваленко И. В., Марущак П. О.** Анализ погрешностей алгоритма идентификации трещин термоусталости // *Автометрия*. 2011. **47**, № 4. С. 49–57.
2. **Psakhie S. G., Smolin A. Yu., Shilko E. V. et al.** About features of transient to steady state deformation of solids // *Journ. Mater. Sci. and Technol.* 1997. **13**, N 1. P. 69–72.
3. **Needleman A.** Computational mechanics at the mesoscale // *Acta Mater.* 2000. **48**, Is. 1. P. 105–124.
4. **Yasniy P., Maruschak P., Konovalenko I.** Measurement of surface mesostrain of plastically deformed steel // *Strain*. 2011. **47**, Suppl. 2. P. 238–241.
5. **Konovalenko I., Maruschak P.** Computer analysis of digital images with quasiperiodical structure // *Proc. of the Intern. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET-2012)*. Lviv-Slavske, 21–24 Feb., 2012. P. 419.
6. **Yasnii P., Marushchak P., Konovalenko I., Bishchak R.** Computer analysis of surface cracks in structural elements // *Mater. Sci.* 2008. **44**, N 6. P. 833–839.
7. **Li V. C., Wu H. C.** Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites // *Journ. Appl. Mech. Rev.* 1992. **45**, N 8. P. 390–398.
8. **Belhachmi Z., Bucur D.** Stability and uniqueness for the crack identification problem // *SIAM Journ. Control Optim.* 2007. **46**, N 1. P. 253–273.
9. **Kirsch A., Ritter S.** A linear sampling method for inverse scattering from an open arc // *Inverse Problems*. 2000. **16**, N 1. P. 89–105.

-
10. **Rondi L.** A variational approach to the reconstruction of cracks by boundary measurements // Journ. Math. Pures Appl. 2007. **87**, N 3. P. 324–342.
 11. **Nishimura N., Kobayashi S.** A boundary integral equation method for an inverse problem related to crack detection // Intern. Journ. Numer. Meth. Eng. 1991. **32**, Is. 7. P. 1371–1387.
 12. **Balokhonov R. R., Romanova V. A., Schmauder S.** Numerical simulation of intermittent yielding at the macro and mesolevels // Comput. Mater. Sci. 2005. **32**, Is. 3–4. P. 261–267.
 13. **Sokolowski J., Zochowski A.** On the topological derivative in shape optimization // SIAM Journ. Control Optim. 1999. **37**, Is. 4. P. 1251–1272.

Поступила в редакцию 5 октября 2012 г.
