

УДК 669.822.5:539.89:539.531

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦВЕТОВОГО КАРТИРОВАНИЯ В МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

© Д. А. Беляев, Ю. Н. Зуев, А. В. Лукин, И. Л. Святлов¹*Статья поступила 17 марта 2015 г.*

Описан метод построения трехмерных цветовых карт, на которых могут быть представлены результаты металлографических исследований структуры и свойств материала образцов, испытанных ударно-волновое нагружение. Метод использовали при измерении поврежденности, твердости и микротвердости на шлифах сечений двух сферических оболочек из сплавов урана, подвергнутых воздействию симметричного взрывного обжигания. При этом структурные изменения и поврежденность в материале оболочек, обусловленные ударно-волновыми процессами, локализируются в объемных сменяющих друг друга зонах. Анализ поврежденности заключался в оценке размеров и форм микротрещин в сечении с обязательной фиксацией их местоположения. Твердость и микротвердость измеряли распределенно и максимально плотно по всему исследуемому сечению. Массив данных измеряемых величин, имеющих координатную привязку, велик, поэтому использование «традиционных» методов для анализа затруднено. Метод цветового картирования, напротив, показал свою эффективность.

Ключевые слова: поврежденность; твердость; микротвердость; пространственное распределение; ударно-волновое нагружение.

Исследование физических и механических свойств материалов, подвергаемых высокоскоростным интенсивным нагрузкам, представляет собой важную научную проблему, имеющую большое практическое значение для современной техники различного назначения. Приложение нагрузок путем детонации взрывчатого вещества, высокоскоростного соударения, быстрого объемного или поверхностного разогрева приводит к возникновению в материалах ударных волн и волн разрежения, вызывающих обратимые и необратимые физико-механические процессы: деформирование, разрушение, фазовые превращения и др. [1].

Изменения свойств материалов под воздействием высокоскоростных физических процессов, происходящих при ударно-волновом нагружении, изучают с помощью постопытного исследования пространственных распределений поврежденности, микротвердости и твердости. Также исследования позволяют получить данные о конечном структурном состоянии в каждом элементарном объеме массивного образца и восстановить историю протекания процессов, вызвавших это состояние [2].

Поврежденность и структурные изменения (фазовые превращения, локализация деформации, динамическая рекристаллизация и др.), как правило, локализуются в виде объемных сменяющих друг друга областей — своеобразного структурного «портрета» экстремального воздействия. Размеры, форма, концен-

трация и взаимное расположение областей в пределах объема образца зависят от характера ударно-волнового нагружения и физико-механических свойств материала [3].

Поврежденность исследуют металлографическими методами на шлифе наиболее представительного сечения [4], для чего производят фотосъемку поверхности шлифа. Мы для этих целей использовали автоматизированный световой микроскоп Olympus GX71, с помощью которого делали снимки (увеличение в 50 или 100 раз) в режиме светлого поля так, чтобы соседние кадры перекрывались.

Твердость и микротвердость материала, по которым оценивали напряженное состояние, измеряли по методу Виккерса с помощью автоматического твердомера Duramin A300E компании Struers (Дания). Максимальное количество определений ограничено доступной для измерений площадью шлифа и минимально возможным расстоянием между отпечатками.

В результате объем экспериментальных данных для каждого сечения образца составил: около 300 снимков, примерно 6300 и 2000 спорадично распределенных отпечатков микротвердости и твердости.

Цель работы — оценка эффективности метода цветового картирования при изучении распределений твердости, микротвердости и поврежденности сферических образцов после внешнего симметричного всестороннего взрывного нагружения [5].

Основу метода цветового картирования составляет представление результатов измерений простран-

¹ РЯЦ-ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия; e-mail: dep5@vniitf.ru

ственных распределений физических величин, кодируемых цветом, в виде 3D-карт распределений [6]. Значения величин при этом даются цветовой шкалой. Области образца, в которых измерения не проводились, заполняют с помощью интерполяции. Это обеспечивает непрерывную цветовую заливку всей исследуемой поверхности.

Одно из основных требований к анализируемому данным — привязка определяемых физических величин к координатам точек измерения в единой для всего образца системе координат.

Таким образом, общий алгоритм исследования состоит из следующих основных этапов: подготовка поверхности, измерения твердости, микротвердости, поврежденности и компьютерная математическая обработка данных с последующей визуализацией распределений в виде цветowych карт.

Общее число определений можно сократить, адаптируя частоту точек измерений под физические особенности исследуемого образца. В областях, где изменения, например, микротвердости, прогнозируемо невелики, определения можно проводить более разреженно. Вблизи структурных границ или иных особенностей строения образца, напротив, чаще.

Полученные в единой системе координат, выбранной из физических соображений при анализе того или иного ударно-нагруженного образца, массивы данных микротвердости $\{x; y; \mu H\}$ или твердости $\{x; y; H\}$ используют для построения цветowych карт распределений.

Выявляемые поврежденности изучают с помощью цифровых панорам высокого разрешения, формируемых сборкой отдельных фотографий в одно большое цифровое полотно. При этом лучшие результаты получаются при автоматической сборке изображений (ImageStitching) с использованием специальных программ (например, PTG, Hugin или MicrosoftICE).

Готовую панораму объемом ~1 Гпикс бинаризуют. При этом повреждения выделяются черным, а сплошной металл — белым цветом. Иные посторонние элементы панорамы на этом этапе устраняются как незначимые. К сожалению, этап бинаризации не удается полностью автоматизировать, поскольку условия съемки и состояние поверхности образца даже в пределах одного шлифа, как правило, всегда различаются. На рис. 1 приведен пример участка поверхности шлифа с поврежденностью и его бинаризованный эквивалент.

Бинаризованное панорамное полотно обрабатывают на компьютере для получения количественных данных о поврежденности. На этом этапе для каждого сечения трещины измеряют и вычисляют определенный набор коэффициентов, характеризующий ее положение, ориентацию, размер и форму. Сечения аппроксимируют эквивалентными эллипсами с такими же

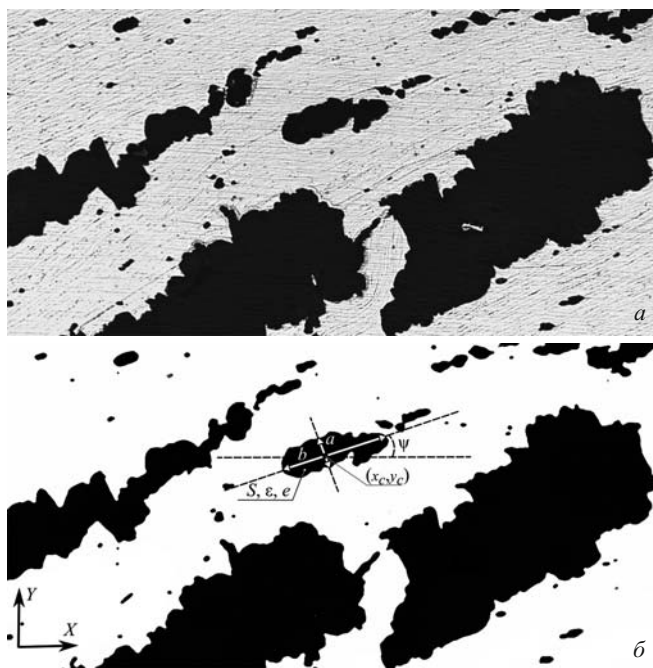


Рис. 1. Изображение поверхности образца с поврежденностью (а) и его бинаризованный эквивалент (б)

вторыми моментами инерции I_{20} и I_{02} , для которых в общем виде можно записать:

$$I_{pq} = \sum_{x,y} (x-x_c)^p (y-y_c)^q,$$

где x, y — координаты пикселей, принадлежащих сечению трещины.

В результате каждой трещине в сечении соответствует однотипный набор данных, содержащий следующие величины (см. рис. 1, б): положение центра тяжести фигуры, образ которой — сечение трещины (x_c, y_c) ; площадь сечения трещины S (приблизительно равна количеству пикселей, умноженному на квадрат коэффициента перевода пикселей в метрические единицы); длины малой a и большой b осей эквивалентного эллипса

$$\left[\begin{aligned} a &= 2\sqrt{\frac{2(I_{20} + I_{02} + \sqrt{(I_{20} + I_{02})^2 + 4I_{11}})}{I_{00}}}, \\ b &= 2\sqrt{\frac{2(I_{20} + I_{02} - \sqrt{(I_{20} + I_{02})^2 + 4I_{11}})}{I_{00}}} \end{aligned} \right];$$

ориентация повреждения в используемой системе координат — угол ψ между осями абсцисс и b

$$\left(\psi = \frac{1}{2} \arctg \frac{2I_{11}}{I_{20} - I_{02}} \right);$$

параметры, характеризующие форму эквивалентного эллипса (коэффициент эллиптичности $e = 4S/\pi ab$ и эксцентриситет $\varepsilon = \sqrt{(b^2 - a^2)/b^2}$).

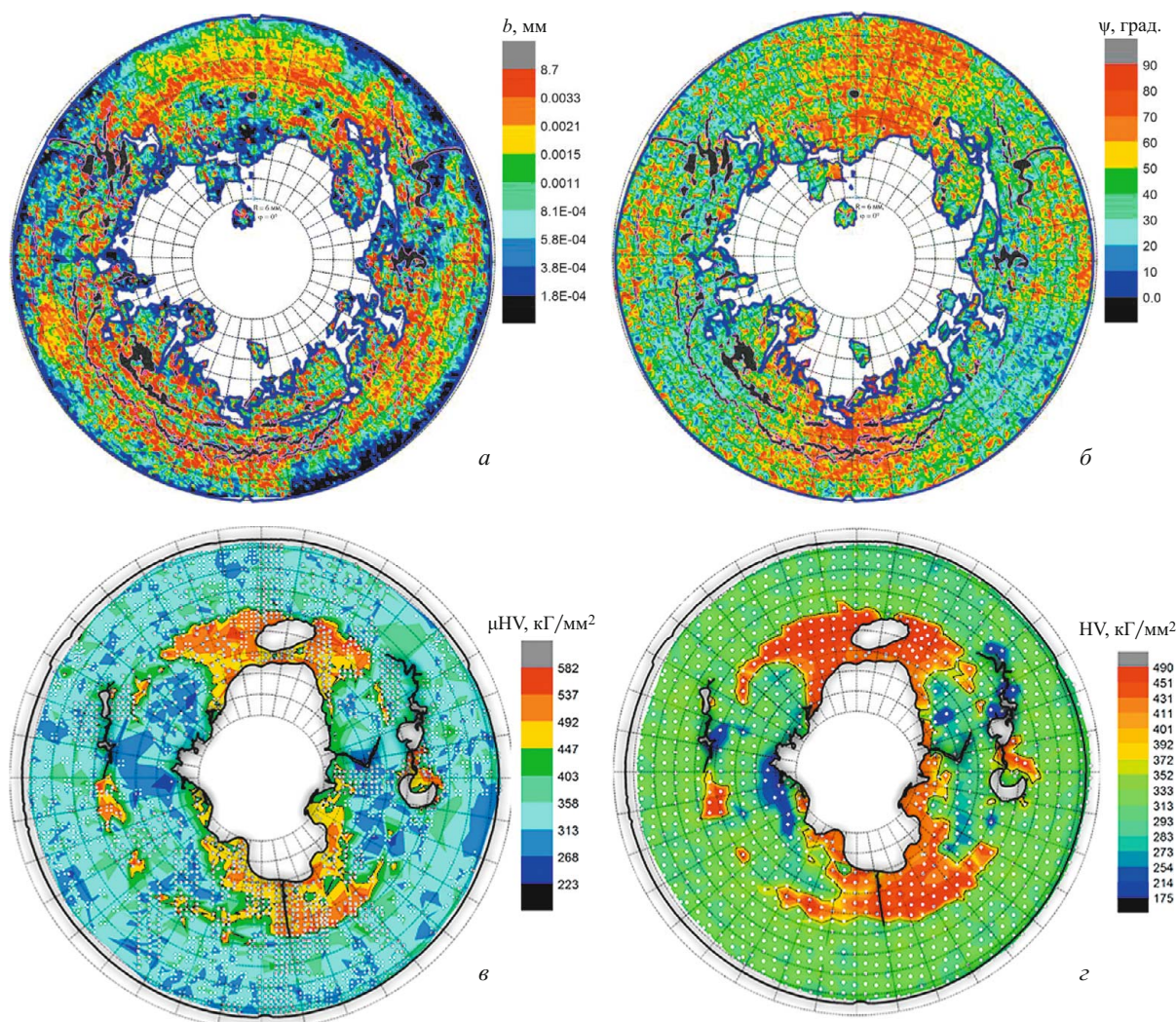


Рис. 2. Пространственные распределения длин (*а*) и углов ориентации трещин относительно радиального направления (*б*), микротвердости (6290 отпечатков) (*в*) и твердости (1262 отпечатка) (*з*) по Виккерсу на меридиональном сечении толстостенной сферической оболочки из сплава урана с молибденом (размеры ячейки координатной сетки — $10^\circ \times 2$ мм)

Полученные массивы данных фильтруют, исключая «лишние» (нефизические значения). Определение и выбор фильтра в каждом случае происходит индивидуально (например, для трещин, имеющих хрупкое происхождение, применяют фильтр $\varepsilon \geq \sqrt{3}/2$, т.е. отбирают те трещины, для которых $b/a \geq 2$ [7]).

Используя фильтрованные таким образом данные, строят цветные карты с помощью специального программного обеспечения. Для этого на координатную сетку методом интерполяции «натягивают» гиперповерхность, передающую пространственное распределение исследуемой физической величины. Полученную поверхность визуализируют в виде цветовой карты распределения. Значения величины кодируют в соответствии с цветовой шкалой. Поскольку массивы данных твердости и поврежденности дискретны по координатам и по значениям физических величин, то пространство между соседними точками заполняется с помощью интерполяции.

Дополнительно на карту помещают всю необходимую сопутствующую информацию: размерные шкалы для координат и картируемой физической величины, обозначения, положение границ структурных зон, крупные повреждения и др. Полученные таким образом карты готовы для сравнительного анализа.

На рис. 2 приведены пространственные распределения микротвердости, твердости и поврежденности, полученные при металлографическом исследовании меридиональных сечений двух сохраненных после симметричного взрывного обжата толстостенных сферических оболочек из сплава урана с молибденом [8]. Оболочки нагружали по схемам и режимам, аналогичным приведенным в [9], с целью изучения свойств материала после интенсивного высокоскоростного воздействия.

Одна из оболочек (см. рис. 2, *а, б*) нагружалась так, чтобы в ее теле произошло множественное расщепление (отколообразование) — низкоинтенсивный уровень нагружения. Другая (см. рис. 2, *в, з*) претерпела не только откольное разрушение, но и локаль-

ное плавление материала во внутренних слоях с ограниченным «залечиванием» образовавшейся при взрывном нагружении поврежденности — высокоинтенсивный уровень нагружения.

Поскольку и исходная, и конечная геометрия оболочек приблизительно сферические, то обработку экспериментальных данных выполняли в полярной системе координат (R, φ).

И низко- и высокоинтенсивно нагруженные оболочки имеют приблизительно концентрическое зонное строение, обусловленное протекавшими ударно-волновыми процессами, а каждая выявленная зона обладает своим набором характеристик.

Первичный сравнительный анализ карт позволяет сделать выводы о некоторых особенностях поведения материала при взрывном воздействии. Так, в оболочке, подвергнутой низкоинтенсивному нагружению (см. рис. 2, а, б), наибольшая концентрация повреждений (преимущественно откольного происхождения) приходится на радиус $R \approx 20$ мм. При этом в южном секторе оболочки наблюдаются кольцеобразные макротрещины, а в северном — множество микротрещин. Поврежденность (главным образом откольной природы) распространена в южном и северном направлениях (в зонах $|\varphi| \leq 30^\circ$), а сдвиговые повреждения и дефекты, характерные для среза, сконцентрированы в восточных и западных областях.

Изучение распределений микротвердости и твердости меридионального сечения оболочки после высокоинтенсивного нагружения (см. рис. 2, в, г) показало: распределения одинаковы в пределах пространственного разрешения и особенностей, обусловленных различием использованных методик измерения. Относительно высокие уровни микротвердости и твердости зафиксированы в слое до $R \approx 15$ мм, сформированном и «залеченном» по откольной поверхности в процессе взрывного нагружения.

Таким образом, метод цветового картирования при металлографическом исследовании позволяет избегать возможных ошибок, связанных с анализом большого объема однотипной информации при невозможности ее наглядного представления, а также визуализировать пространственные распределения результатов измерений физических величин и анализировать экспериментальные данные с привязкой их к пространственному положению.

Применение метода исследования образцов из сплава урана с молибденом, сохраненных после ударно-волнового нагружения, дает возможность выявлять области с различными уровнями твердости и микротвердости, участки локализации повреждений, соответствие особенностей пространственных распределений твердости, микротвердости и поврежденности локальному структурному состоянию образцов. Метод может быть распространен и на такие параметры, как, например, ширина двойников, размеры зерен, размер металлургических включений и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография под общей редакцией д. ф.-м. н. М. В. Жерноклетова — Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — 403 с.
2. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М. А. Мейерсаи Л. Е. Мурра. — М.: Металлургия, 1984. — 512 с.
3. Козлов Е. А., Литвинов Б. В., Тимофеева Л. Ф., Курило В. С., Орлов В. К. Структурные, фазовые превращения и откольные разрушения шара из δ -фазного сплава плутония с галлием в сферических волнах напряжений / Физика металлов и металловедение. 1996. Т. 81. Вып. 6. С. 139 – 157.
4. Curran D. R., Seaman L. Dynamic Failure of Solids / Phys. Rep. Rev. Sect. Phys. Lett. 1987. N 5 – 6. P. 253 – 388.
5. Беляев Д. А., Зуев Ю. Н., Козлов Е. А., Подгорнова И. В., Святков И. Л. Металлографические исследования урановых оболочек после ударно-волнового нагружения с применением метода цветового картирования / Тезисы докладов IX Международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». 2011. С. 53.
6. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 1104 с.
7. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
8. Козлов Е. А., Беляев Д. А., Зуев Ю. Н., Святков И. Л. Откольные и сдвиговые повреждения оболочки из сплава U – 1,5 % Mo при взрывном нагружении / Деформация и разрушение материалов. 2012. № 2. С. 26 – 30.
9. Козлов Е. А., Бродова И. Г., Бричков С. А., Горбачев Д. М., Яблонских Т. И. Откольные и сдвиговые разрушения, структурные и фазовые превращения в оболочках из стали 30ХГСА при двух режимах взрывного нагружения / Деформация и разрушение материалов. 2010. № 1. С. 17 – 25.

REFERENCES

1. Zhernokletov M. V. (ed.) Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh. Monografiya [Methods to study material behavior under high-intensity dynamic loading. Monograph]. — Sarov: Izd. RFYaTs-VNIIEF, 2003. — 403 p. [in Russian].
2. Meyers M. A., Murr L. E. (eds.). Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoi deformatsii metallov [Shock waves and high-strain-rate deformation of metals]. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 512 p. [in Russian].
3. Kozlov E. A., Litvinov B. V., Timofeeva L. F., Kurilo V. S., Orlov V. K. Strukturnye, fazovye prevrashcheniya i otkol'nye razrusheniya shara iz δ -faznogo splava plutoniya s galliym v sfericheskikh volnakh napryazhenii [Structural, phase transformations, and spall fracture of a sphere from the δ -phase plutonium alloy with gallium in spherical stress waves] / Fiz. Met. Metalloved. 1996. Vol. 81. Issue 6. P. 139 – 157 [in Russian].
4. Curran D. R., Seaman L. Dynamic Failure of Solids / Phys. Rep. Rev. Sect. Phys. Lett. 1987. N 5 – 6. P. 253 – 388.
5. Belyaev D. A., Zuev Yu. N., Kozlov E. A., Podgornova I. V., Svyatov I. L. Metallograficheskie issledovaniya uranovykh obolochek posle udarno-volnovogo nagruzheniya s primeneniem metoda tsvetovogo kartirovaniya [Metallographic study of uranium shells after shock-wave loading using color mapping method] / Abstrs. of the IX Int. Urals Sem. "Radiation Physics of Metals and Alloys." 2011. P. 53 [in Russian].
6. Anufriev I. E., Smirnov A. B., Smirnova E. N. MATLAB 7. — St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005. — 1104 p. [in Russian].
7. Vladimirov V. I. Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov [Physical nature of metal fracture]. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 280 p. [in Russian].
8. Kozlov E. A., Belyaev D. A., Zuev Yu. N., Svyatov I. L. Otkol'nye i sdvigovye povrezhdeniya obolochki iz splava U – 1,5 % Mo pri vzryvnom nagruzhenii [Spall and shear fracture of a U – 1.5% Mo alloy shell under explosive loading] / Deform. Razrush. Mater. 2012. N 2. P. 26 – 30 [in Russian].
9. Kozlov E. A., Brodova I. G., Brichikov S. A., Gorbachev D. M., Yablonskikh T. I. Otkol'nye i sdvigovye razrusheniya, strukturnye i fazovye prevrascheniya v obolochkakh iz stali 30HGSA pri dvukh rezhimakh vzryvnogo nagruzheniya [Spall and shear fracture, structural and phase transformations in shells of 30KhGSA steel under two modes of explosive loading] / Deform. Razrush. Mater. 2010. N 1. P. 17 – 25 [in Russian].