

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ РЕЛЬЕФА ИЗЛОМОВ РАЗРУШЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. М. А. Артамонов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Филиал ПАО “ОДК-УМПО” ОКБ им. А. Люльки, Москва, Россия

\*E-mail: maxartamonov@gmail.com

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 29.06.2020 г.

Представлена методика определения периодичности рельефа, в частности шага усталостных бороздок, формирующихся в процессе усталостного разрушения металлов. Надежность определения периода усталостных бороздок с помощью этой методики сохраняется и в критических условиях, например при окислении поверхности, повреждении излома вследствие взаимного контактирования берегов трещины и подобных процессах.

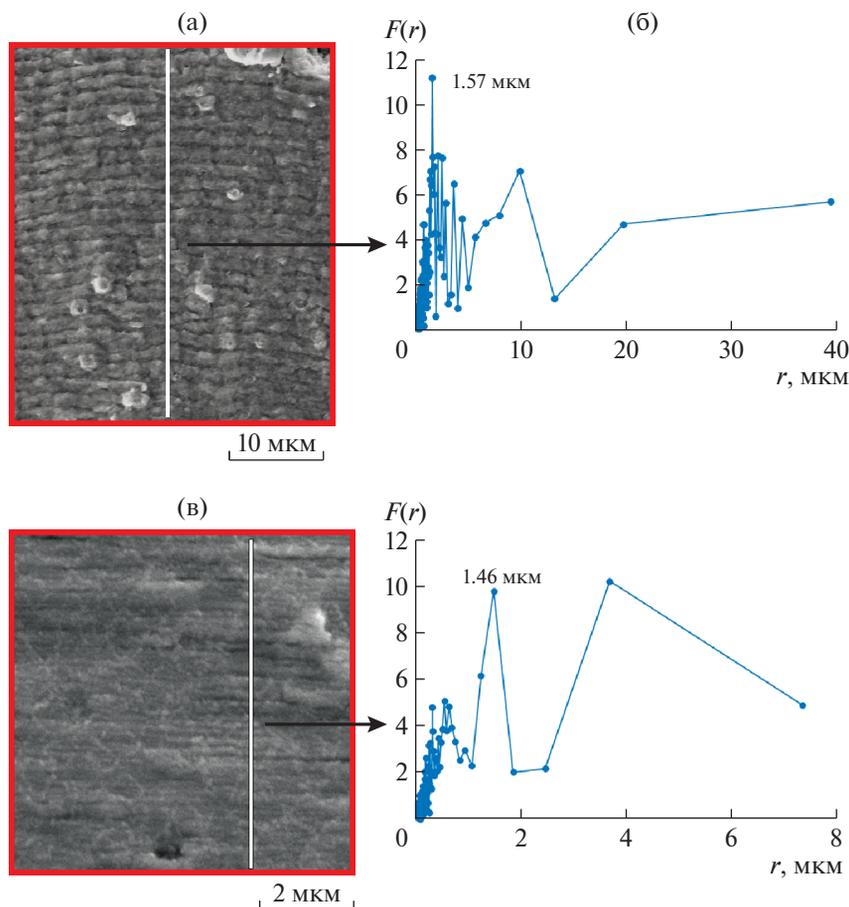
DOI: 10.31857/S0023476121040020

### ВВЕДЕНИЕ

С развитием растровой электронной микроскопии (РЭМ) появились новые возможности изучения рельефов изломов разрушенных материалов с целью определения условий и факторов, при которых происходило разрушение. Хотя фрактография развивалась и до появления электронной микроскопии, с помощью оптической микроскопии, использование прибора, разрешающего получать изображение поверхностей с увеличением более 1000 крат, причем со значительно большей глубиной резкости, позволило определить особенности протекания разрушения у широкого ряда материалов.

Важные исследования в области механики разрушения, выполненные на алюминиевых сплавах, принадлежат С.А. Цапфа и С.Д. Уордену [1]. Ими на поверхности усталостных изломов обнаружены специфические полосчатые образования – усталостные бороздки (УБ). Наличие УБ в изломе является одним из главных признаков усталостной природы разрушения [2–4]. Механизм формирования объектов со специфической морфологией остается актуальным предметом научных исследований. Предложен ряд моделей образования УБ [5–8], однако до сих пор не удалось создать общепринятую теорию, описывающую для различных материалов условия, при которых наблюдается формирование УБ. Практически у всех предложенных моделей УБ отражают последовательное положение фронта усталостной трещины на разных этапах развития. Проведенные эксперименты по усталостному росту трещины с маркированием отдельных блоков усталостных цик-

лов показали, что для поликристаллических материалов формирование одной УБ соответствует одному циклу нагружения [9–11]. Такое утверждение позволяет, проводя измерения шага УБ (ширины) на разном расстоянии от очага, определить кинетику роста усталостной трещины. Это в свою очередь дает возможность вычислить длительность развития усталостной трещины (живучесть), что необходимо для понимания развития усталостной трещины в деталях. Такие данные составляют основу ряда критериев, по которым определяют ресурс безопасной эксплуатации техники (прежде всего аэрокосмической) [12]. В этом контексте возникает вопрос об определении шага УБ с высокой точностью. Для исключения субъективного фактора оператора и одновременного повышения точности предпочтительно измерения проводить в автоматическом режиме. Однако до настоящего времени измерение параметров УБ проводилось в “ручном” режиме. При этом исследователь (фрактограф) проводил измерение параметров УБ непосредственно по изображению, полученному в электронном микроскопе, проводя измерения от точки к точке. Измерения для УБ, имеющих относительно большие размеры (около 1 мкм), не представляют сложности. Проблемы возникают в случае изучения УБ, образовавшихся на начальной стадии формирования (при размерах шага около 0.01 мкм). Такая задача требует высокой квалификации исследователя. В некоторых случаях проведение измерения параметров УБ усложняется условиями роста усталостной трещины, а именно окислением или/и вторичным повреждением рельефа. Все это



**Рис. 1.** РЭМ-изображения усталостных бороздок со средним шагом 1.5 (а), 0.16 мкм (в) (белая полоса — линия, вдоль которой исследован профиль) и соответствующие фурье-преобразования (б, г).

привносит значительные трудности в корректные измерения шага УБ.

Предпринятые до настоящего времени попытки создания автоматизированной методики измерения шага УБ основывались на использовании преобразования Фурье, которое наилучшим образом подходит для определения периодичности на изображениях [9, 13]. Большинство современных электронных микроскопов снабжено программным обеспечением с возможностью приложения двумерного фурье-преобразования или фурье-преобразования профиля. Современные вычислительные мощности позволяют получать фурье-преобразование в режиме реального времени, хотя в измерениях шага УБ такой режим практически не используется. Фурье-преобразование позволяет получить хороший результат при преобразовании профилей УБ с постоянным шагом и относительно больших УБ, которые формируются на заключительной стадии роста трещины. При попытке использования фурье-преобразования для начальной стадии формирования УБ в условиях малой скорости роста трещины, особенно в неблагоприятных условиях (окисление

поверхности и т.д.), результат оказывается мало надежным. Для иллюстрации приведены результаты фурье-преобразования двух видов УБ (рис. 1). На рисунке представлены участки излома и показаны сечения, использовавшиеся для фурье-преобразования. Для удобства зависимость коэффициентов фурье-преобразования показана не от частоты, а от периода (в мкм). Анализ спектров Фурье показал, что если для первого случая (рис. 1а, 1б), соответствующего заключительной стадии формирования УБ, наблюдается пик, совпадающий с шагом УБ в 1.5 мкм, то для второго случая (рис. 1в, 1г) совпадения пика и среднего шага УБ, равного 0.16 мкм, не наблюдается.

В представленной работе предложена математическая методика определения периодичности, лишённая недостатков, изложенных выше. Использование такой методики позволяет определять шаг УБ, в том числе на начальной стадии их формирования. Настоящую методику можно использовать для определения других периодических структур и объектов, наблюдаемых на поверхности материалов.

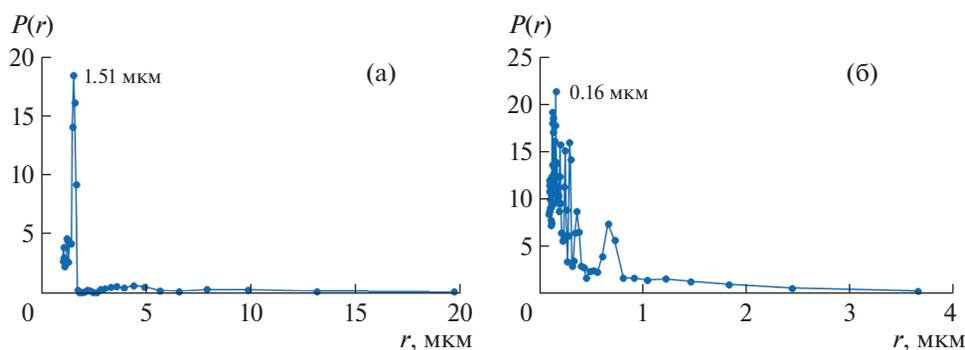


Рис. 2. Функции плотности распределения локальных максимумов  $P(r_i)$ : а – для участка излома, показанного на рис. 1а; б – для участка, показанного на рис. 1в.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ

*Усреднение коэффициентов фурье-преобразования.* Для получения достоверной информации о периодичности рельефа недостаточно исследовать один профиль. Как показало исследование различных профилей, полученных с одного участка, локальные пики фурье-преобразования могут значительно отличаться для разных сечений. Поэтому было проведено усреднение коэффициентов фурье-преобразований, полученных по множеству профилей сечений:

$$Fm(r_i) = \frac{1}{N} \sum_n F(r_i)_n,$$

где  $N$  – количество сечений, по которым проводились фурье-преобразования.

Распределения усредненных коэффициентов фурье-преобразования, полученных для микрофотографий, показанных на рис. 1, имеют такой же вид, что и распределения коэффициентов фурье-преобразования одиночных сечений, показанные на рис. 1б и 1г, – локальный пик на периоде 1.5 мкм для рис. 1а и отсутствие выраженного пика на периоде 0.16 мкм для рис. 1в.

*Кумулятивная функция локальных максимумов фурье-преобразования.* Введем кумулятивную функцию локальных максимумов  $\Phi_n(r_{\min}, r_i)$ , полученную для сечения  $n$  по яркости:

$$\Phi_n(r_{\min}, r_i) = \max_{[r_{\min}, r_i]} F_n(r),$$

где  $r_{\min}$  – минимально возможный период, зависящий от разрешения фотографии (размера пикселя),  $r_i$  варьируется от минимального до максимально возможного значения периода (максимальное значение определяется длиной сечения).

Функция  $\Phi_n(r_{\min}, r_i)$  обладает свойством кумулятивных функций и является возрастающей.

Усредним полученные кумулятивные функции по сечениям:

$$\Phi(r_{\min}, r_i) = \frac{1}{N} \sum_n \max_{[r_{\min}, r_i]} F_n(r).$$

Можно показать, что полученная усредненная кумулятивная функция также не убывает с ростом  $r_i$ . Дифференцируя усредненную кумулятивную функцию, получим функцию распределения локальных максимумов на всей анализируемой поверхности излома:

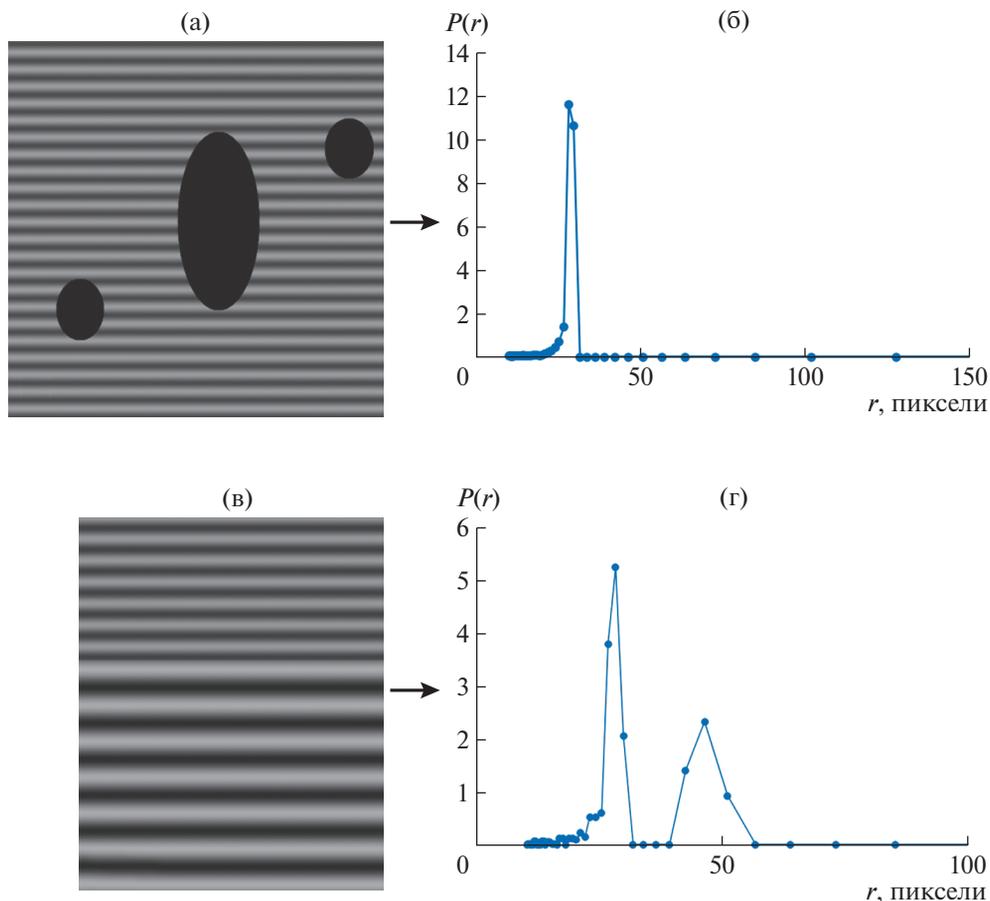
$$P(r_i) = \frac{d\Phi(r_{\min}, r_i)}{dr_i}.$$

Результаты применения данной методики для микрофотографий, показанных на рис. 1, представлены на рис. 2. Видно, что для обеих микрофотографий полученные максимумы функций  $P(r_i)$  соответствуют шагу УБ, наблюдаемых на соответствующих изображениях.

*Применение методики к модельным периодическим структурам.* Для подтверждения соответствия между периодичностями структуры и значениями максимумов, полученными с применением описанной методики, сформированы модельные волны, имеющие заданные периодичности. Модельные структуры и результаты обработки с применением предложенной методики представлены на рис. 3. Для каждой структуры получена функция усредненных коэффициентов фурье-преобразования  $Fm(r_i)$ , усредненная кумулятивная функция  $\Phi(r_i)$  и функция распределения локальных максимумов  $P(r_i)$ .

Анализ результатов использования предложенной методики на различных модельных волнах яркости позволяет определить ее основные свойства и особенности:

– значения полученных пиков в функциях усредненных коэффициентов фурье-преобразования  $Fm(r_i)$  и распределения локальных максимумов  $P(r_i)$  соответствуют периоду модельных волн (рис. 3). Однако для функции  $P(r_i)$  наблюдается незначительное снижение периода по срав-



**Рис. 3.** Модельная волна с периодом 30 пикселей с дефектными участками (а) и соответствующая функция  $Fm(r_i)$  (б); две модельные волны с периодами 30 и 50 пикселей (в) и  $Fm(r_i)$  (г).

нению с периодом модельной волны. Такой эффект связан с тем, что на формирование пика оказывает влияние только левое расширение пика фурье-преобразования. Чем шире пик, тем существеннее отклонение от заданного периода;

– наличие дефектов в изображениях или малая площадь периодической структуры (рис. 3а) не сказываются на определении периода (рис. 3б);

– наличие нескольких периодических структур с разными периодами на исследуемом участке (рис. 3в) не препятствует определению их периодов (рис. 3г). Однако присутствует возможность маскировки структур, имеющих больший период, структурами с меньшим периодом. Высота пика функции распределения локальных максимумов зависит от ширины пика коэффициентов фурье-преобразования – чем шире пик функции  $Fm(r_i)$ , тем меньше получаемый пик функции  $P(r_i)$  (рис. 3г).

*Применение методики к изломам с усталостными бороздками.* Полученная методика применена к микрофотографиям изломов, имеющих УБ. Результат применения показан на рис. 4, где приве-

дены функция распределения локальных максимумов  $P(r_i)$  и функция усредненных коэффициентов фурье-преобразования  $Fm(r_i)$ . Количество сечений, по которым проводили анализ для усредненных функций, достигало 500–600 для микрофотографии. Излом относится к никелевому сплаву ЭП741НП, испытанному на малоцикловую усталость при температуре 750°C (при такой температуре наблюдается окисление поверхности). Видно, что период, соответствующий максимуму функции  $P(r_i)$ , совпадает со средним шагом УБ, определенным фрактографическим, “ручным” способом, и равен 0.26 мкм (рис. 4б).

Для повышения точности определения периода важен выбор увеличения. Необходимо, чтобы период объекта не попадал в диапазон, соответствующий малым частотам из-за большого расстояния между периодами  $r_i$  (к данным размерам будет смещаться период объекта при больших увеличениях), и не попадал в диапазон, соответствующий большим частотам (слишком малое увеличение) вследствие снижения разрешения, при котором выявляются периодичности струк-

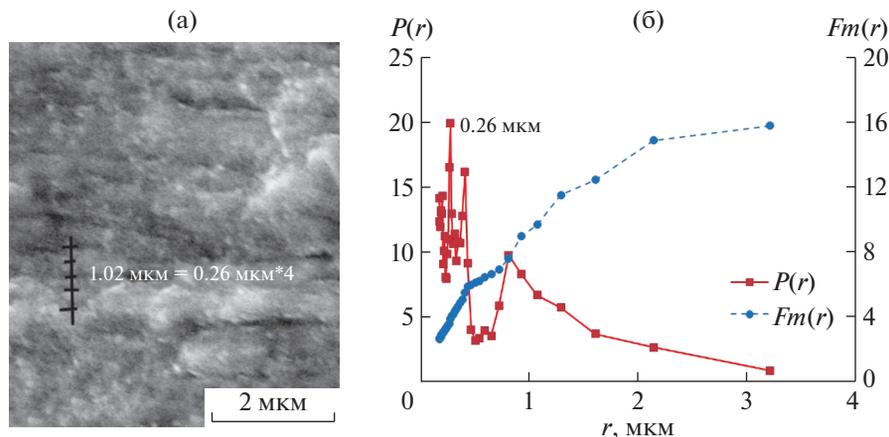


Рис. 4. Участок излома с усталостными бороздками, на котором показан блок из четырех УБ длиной 1.02 мкм, средний размер 0.26 мкм (а); функция  $P(r)$ , максимум находится на 0.26 мкм, и функция  $Fm(r)$  (б).

туры. Для определения нужного увеличения можно проводить съемку объекта при разном увеличении и для каждого увеличения использовать данную методику. Это позволит определить, при каком увеличении максимум функции находится в оптимальном диапазоне периодов.

Когда формируются большие УБ, возможно наблюдение микробороздок внутри основной УБ [14–16]. Возможна ситуация, когда максимум функции  $P(r_i)$  будет соответствовать микробороздкам, поэтому следует проверять, на что реагирует функция  $P(r_i)$ . Отметим, что у функции усредненных коэффициентов фурье-преобразования  $Fm(r_i)$  для больших УБ также отмечается выраженный пик, который можно использовать для идентификации периода УБ.

## ВЫВОДЫ

Предложенная методика определения периодичности хорошо работает для определения шага как для больших усталостных бороздок, так и для маленьких, образующихся на начальной стадии их формирования. Надежность определения периода УБ с помощью данной методики сохраняется при наличии неблагоприятных условий, таких как окисление поверхности, повреждения вследствие взаимного контактирования берегов трещины и т.д.

Предложенную методику можно использовать не только для определения шага УБ, но и для определения периодичности других объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zappfe C.A., Worden C.O. // Trans. Am. Soc. Metals. 1951. V. 43. P. 958.
2. Hall L.R., Chan R.C. // Eng. Fract. Mechanics. 1971. V. 3. № 2. P. 169.
3. Forsyte P.J.E., Rider D.A. // Aircraft Eng. 1960. V. 32. № 374. P. 96.
4. Pelloux R.M.N. // Proc. Third Annual Scanning electron Microscope Symposium. Iv. 1970. P. 281.
5. McMillan J.C., Pelloux R.M.N. // ASTM STP 415. 1967. P. 505.
6. Laird C. // ASTM STP 415. 1967. P. 131.
7. Шанявский А.А. // Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Уфа: Монография, 2003. 802 с.
8. Туманов Н.В. // Механизм устойчивого роста усталостных трещин. Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: Труды XXXV конференции “Актуальные проблемы прочности”. 1999. Т. 1. С. 307.
9. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография: Усталостное разрушение. Челябинск: Metallurgy, 1988. 396 с.
10. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Metallurgy, 1981. 279 с.
11. Bates R.C., Clark W.G. // Trans. ASM. 1969. V. 62. № 2. P. 380.
12. Потанов С.Д., Перепелица Д.Д. // Двигатель. 2010. № 5. С. 28.
13. Sasov A. Yu., Shanyavsky A.A. // Scanning Microscopy. 1988. V. 2. № 2. P. 827.
14. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. М.: Metallurgy, 1990. 623 с.
15. Лимарь Л.В. Фрактодиагностика авиационных деталей из титановых сплавов. Верхняя Салда: ОАО “Корпорация “ВСМПО-АВИСМА”. 2011. 157 с.
16. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник / Под ред. Феллоуза Дж.А. М.: Metallurgy, 1982. 489 с.