

## **К исследованию кинетики малых поверхностных трещин при высокочастотном нагружении легких сплавов**

**И. М. Васинюк, А. В. Войналович, Г. Г. Писаренко**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Для случая циклического нагружения металлических материалов в диапазоне частот 100...10000 Гц предложена методика исследования распространения малых трещин с использованием системы измерения реакции дефектного участка материала на воздействие высокочастотного электромагнитного поля. Представлены подходы к построению измерительного комплекса для определения длины малых поверхностных трещин, развивающихся от вносимого начального дефекта, а также сформулированы требования к выбору геометрических параметров начального концентратора. Установлено, что при одинаковом уровне циклических напряжений короткие усталостные трещины (~0,1...0,2 мм) формируются раньше (относительно числа циклов до разрушения) при более высокой частоте нагружения.*

В связи с увеличением прочностной и вибрационной нагруженности конструктивных элементов современных машин и механизмов уменьшаются критические размеры дефектов, вследствие чего ограничивается время до возникновения трещин опасных размеров. При этом скорости роста малых трещин превышают параметры безопасного нагружения, определенные методами линейной механики разрушения [1]. Поэтому изучение кинетики малых трещин позволит повысить эффективность методов прогнозирования долговечности высоконагруженных элементов конструкций современных машин большого ресурса. Для обнаружения повреждения и исследования его развития на различных стадиях усталости должны использоваться специальные методы, с помощью которых можно оценить размеры коротких (от десятков микрометров) трещин и величину их приращения с учетом реальных условий нагружения элементов конструкций.

Проведение высокочастотных усталостных испытаний в установленном стандартом [2] диапазоне частот от 100 Гц до 10...20 кГц предусматривает резонансный режим нагружения, что обуславливает использование испытательного оборудования принципиально различного типа [3]. В данном случае затруднено применение имеющихся высокоточных оптических измерительных комплексов [4, 5] ввиду специальных требований к условиям проведения испытаний, более целесообразным является использование электронных методов, основанных на традиционных принципах индикации дефектов [6], но обладающих высокими метрологическими характеристиками, реализуемыми на современной технической базе. Метод, основанный на измерении изменений собственной частоты нагружения образца [7] и традиционно используемый при высокочастотных испытаниях для отслеживания развития усталостной трещины, неприемлем для коротких поверхностных трещин, так как при их распространении площадь поперечного сечения уменьшается незначительно.

Для определения коротких трещин и несплошностей в поверхностных слоях металлических материалов наиболее целесообразно применять резонансные электромагнитные методы, известные в дефектоскопии как метод вихревых токов [8]. Вихревые токи, возникающие в металле вследствие воздействия переменного электромагнитного или движущегося магнитного поля, огибают препятствия в виде трещин и других несплошностей, что приводит к изменению симметрии, амплитуды и фазы вторичного магнитного поля, т.е. результирующее электромагнитное поле несет в себе информацию о состоянии контролируемого объекта. При этом зарегистрированный сигнал зависит от ряда факторов: наличия и расположения несплошности, увеличивающей траекторию вихревых токов; удельной электрической проводимости; магнитной проницаемости; магнитных потерь; формы и взаимного расположения источников электромагнитного поля и контролируемого объекта; частотно-временных параметров электромагнитного поля измерительного сигнала.

Такое количество влияющих на результаты измерения факторов позволяет оптимизировать применяемую измерительную аппаратуру по критерию повышения избирательности и чувствительности с помощью анализа изменений электрических параметров возбуждающих и измерительных катушек, используя математический аппарат теории взаимодействия электромагнитного поля и поверхностных слоев металла в зоне влияния создаваемого поля.

Однако значительные сложности в обеспечении достоверности результатов при проведении контроля возникают из-за сопутствующих факторов, что обуславливает появление ложных сигналов в регистрирующей аппаратуре, срабатывание пороговых систем сигнализации или изменение показаний аналоговых индикаторов в пределах установленной величины. Так, нестабильность физических параметров материала может более существенно изменить вносимое комплексное сопротивление, чем дефектный участок. Отличием от дефектов типа трещины для таких изменений является то, что изменение структурного состояния, как правило, не имеет резко очерченных границ и занимает определенную площадь. Ко второму типу сопутствующих факторов относятся: изменение расстояния между поверхностью контролируемого изделия и катушкой преобразователя; эффект от изменения кривизны контролируемого объекта, а также краевой эффект, т.е. близость края контролируемого объекта к датчику.

При создании методических средств для измерения трещин основная идея устранения влияния различных сопутствующих факторов, затрудняющих трактовку результатов измерений, состоит в многофакторном аппаратном анализе параметров, незначительно зависящих от того или иного фактора (например, фазы при отстройке от зазора), или в определенной корректировке результирующего сигнала. Дефектоскопы, соответствующие указанным условиям, могут быть сконструированы с использованием автогенераторного принципа [8].

Блок-схема разработанного с учетом рассмотренных условий вихревого индикатора дефектов автогенераторного типа представлена на рис. 1. Составляющими элементами прибора являются: высокочастотный  $LC$ -генера-

тор, настроенный на измерительную частоту 3,5 МГц; фильтр, выделяющий постоянную составляющую из колебаний генератора; компаратор, сравнивающий величину этой составляющей с некоторым опорным напряжением; низкочастотный управляемый звуковой генератор, вырабатывающий сигналы звуковой и световой индикации дефекта [9]. Для отслеживания кинетики коротких усталостных трещин предусмотрено измерение цифровым вольтметром аналогового сигнала, пропорционального размеру дефекта. Датчик прибора представляет собой элемент колебательного контура с рабочей частотой, достаточно высокой для повышения плотности вихревых токов в зоне дефекта с целью улучшения метрологических параметров прибора (диаметр излучающей поверхности датчика составляет 3 мм). Особенностью предлагаемой методики контроля кинетики коротких трещин при высокочастотных испытаниях является обеспечение локальности установки датчика вихревого индикатора дефектов с помощью механизма трехкоординатного прецизионного перемещения. Глубина проникновения электромагнитного поля в металл зависит от электропроводности исследуемого сплава и измерительной частоты комплекса (при частоте 3,5 МГц для титана она составляет 0,63 мм, для алюминия – 0,08 мм) [8].

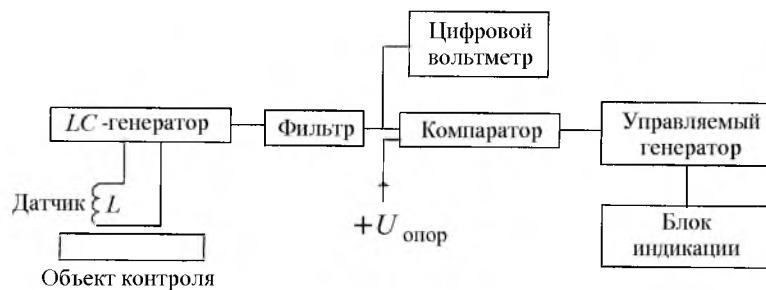


Рис. 1. Блок-схема вихретокового индикатора дефектов автогенераторного типа.

Исследования выполнены на образцах из титановых сплавов ПТ7М и ВТ1-0, отличающихся различной степенью легирования и уровнем сопротивления усталости, а также из алюминиевого сплава 01570, механические свойства которого близки к таковым сплава АМг6Н. Усталостные испытания проводили при однородном растяжении–сжатии на испытательной машине “Amsler” электромагнитного типа (частота нагружения 100...110 Гц) и на магнитоотрицательной установке (частота нагружения 10 кГц).

Процесс развития малых трещин исследовали на доработанных стандартных образцах для высокочастотных усталостных испытаний [2]. Чтобы повысить точность измерений, вдоль рабочей части образцов выполняли две симметричные продольные лыски шириной около 5 мм каждая (рис. 2), поверхность которых электроотполировывали с целью исключения влияния поверхностной механической обработки и выявления микроструктуры. Для инициации зарождения усталостной трещины в заданном месте рабочей части образца на одной из лысок в срединном ее сечении с помощью твердомера наносили укол алмазной пирамидой таким образом, чтобы диагонали отпечатка пирамиды были ориентированы вдоль осей симметрии

лыски. Фотографии микроструктуры в зоне отпечатка с трещиной, зафиксированной на различных стадиях испытаний образцов из исследованных титановых сплавов, приведены на рис. 3. При этом усилие прижима алмазной пирамиды подбиралось для каждой партии исследуемых сплавов таким образом, чтобы длина диагонали отпечатка на поверхности образца не превышала 1,0 мм.

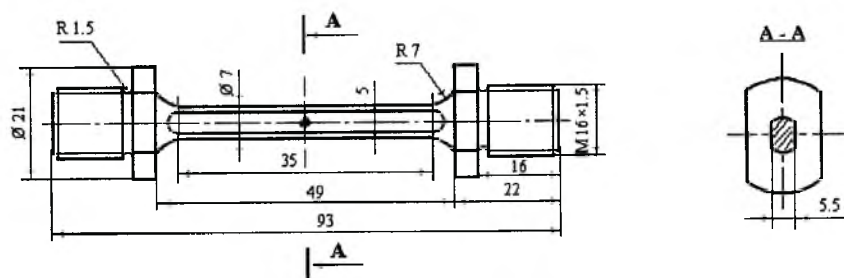


Рис. 2. Доработанный образец для высокочастотных усталостных испытаний.

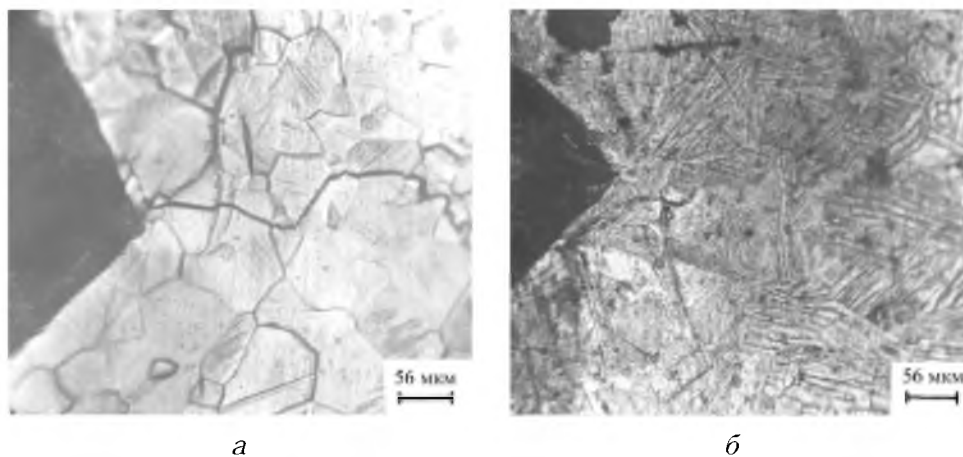


Рис. 3. Развитие усталостной трещины в области отпечатка индентора на поверхности образцов из титановых сплавов ВТ1-0 (а) и ПТ7М (б).

Выбор таких размеров отпечатка пирамиды на поверхности рабочей части образцов обусловлен необходимостью согласования двух условий: а) отпечаток-микрорезект должен локализовать зарождение усталостной трещины в заданном сечении, что особенно важно при испытаниях на установках электромагнитного типа с однородным распределением циклических напряжений по длине рабочей части образца; б) величина эффективного коэффициента концентрации напряжений, обусловленной наличием нанесенного микрорезекта, не должна превышать 1,1, что позволяет получить результаты усталостных испытаний, сравнимые с таковыми неиндентированных образцов.

В работе [10] для микрорезектов различной формы, в том числе и для отпечатка пирамидой Виккерса, предложена зависимость предела выносливости  $\sigma_w$  как функции структурного параметра (твердости по Виккерсу

HV) и геометрического параметра микродефекта  $S_{\perp\sigma}$  (площади проекции микродефекта на плоскость, перпендикулярную направлению напряжений):

$$\sigma_w = 1,43(HV + 120) / (\sqrt{S_{\perp\sigma}})^{1/6}.$$

Выполненные расчеты для образцов из исследованных сплавов показали, что с учетом 10%-ной погрешности приведенной выше формулы усредненный размер диагонали отпечатка составляет 1,2 мм.

Чтобы оценить влияние такого дефекта и чистоты обработки поверхности рабочей части образцов на их циклическую долговечность, на испытательной машине "Amsler" были выполнены сравнительные усталостные испытания стандартных образцов из алюминиевого сплава 01570 и образцов с нанесенными лысками и отпечатками. Усталостные испытания партии индентированных образцов (с нанесенным отпечатком) проводили на трех уровнях циклических напряжений. Последующая статистическая обработка результатов усталостных испытаний гладких и индентированных образцов свидетельствует о том, что они принадлежат к одной генеральной совокупности с линией регрессии, близкой к линии регрессии результатов испытаний стандартных образцов, что позволяет при выборе уровней циклической нагрузки индентированных образцов ориентироваться на кривые усталости стандартных образцов из исследованных сплавов.

Согласно предложенной методике, о развитии усталостного повреждения можно было судить по изменению уровня аналогового сигнала с датчика, пропорционального величине высокочастотного электросопротивления металла в контролируемом объеме образца.

При изменении уровня аналогового сигнала на определенную величину от исходного состояния испытания прекращали. Тарировку аналогового сигнала осуществляли после измерения длины поверхностной трещины на металлографическом микроскопе МИМ-8 ("200). В результате построения тарировочной зависимости установлено, что относительному изменению уровня аналогового сигнала от датчика дефектоскопа на 1% (15 мВ в абсолютных величинах) соответствует приращение трещины на 0,2 мм, а начальный уровень обнаружения и измерения трещины составляет 50 мкм. При этом в случае зарождения и развития трещин одновременно от двух углов отпечатка учитывалась общая длина двух противоположно ориентированных трещин. Затем образец снова закрепляли в захватах испытательной машины с сохранением идентичности позиционирования измерительного датчика и продолжали его нагружение при таком же уровне циклических напряжений. Для отвода тепла при циклическом высокочастотном нагружении исследованных пластических сплавов, в частности титанового сплава ВТ1-0, проводили воздушное охлаждение рабочей части образцов.

Результаты усталостных испытаний стандартных образцов из исследованных сплавов иллюстрирует рис. 4. Там же при одинаковом для низкой (100 Гц) и высокой (10000 Гц) частот нагружения уровне циклических напряжений представлены в виде совокупностей точек моменты остановки испытаний для определения длины усталостной трещины на поверхности образцов с лысками с помощью микроскопа МИМ-8. Уровни циклических

напряжений для каждого из сплавов выбраны таким образом, чтобы они на 10...20% превышали предел выносливости сплава при частоте 10000 Гц. Представленные результаты позволяют судить о том, что для всех сплавов усталостные трещины длиной более 0,1 мм формируются при превышении 50%-ной общей долговечности испытанных образцов как при низкой, так и при высокой частоте нагружения.

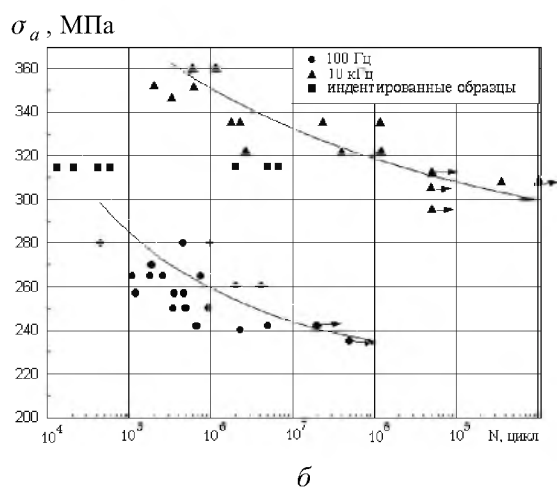
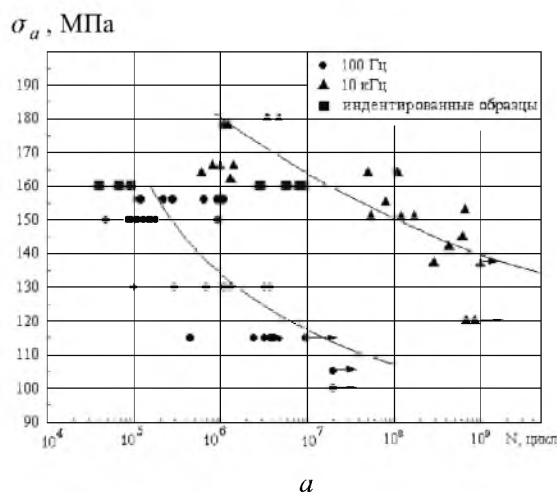


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний образцов из сплавов 01570 (а) и ПТ7М (б) при разных частотах нагружения.

На рис. 5 в координатах длина трещины – относительное число циклов до разрушения представлены кинетические диаграммы усталостной трещины в сплавах ПТ7М и 01570 при частоте нагружения 100 и 10000 Гц. Сравнение диаграмм, описывающих изменение длины усталостной трещины на низкой и высокой частоте нагружения, показывает, что при одинаковом уровне циклических напряжений трещины длиной 0,1...0,2 мм формируются раньше (относительно разрушающего числа циклов) при более

высокой частоте нагружения (10000 Гц). При этом указанная тенденция характерна для всех исследованных сплавов, т.е. для реализованной частоты нагружения 100 Гц при одном и том же относительном числе циклов до разрушения  $N/N_p$  ( $N_p$  – число циклов до разрушения) будут сформированы более короткие трещины, чем для частоты 10000 Гц. Это может быть объяснено разницей в пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений для рассматриваемого диапазона частот нагружения. Кроме того, сравнение представленных диаграмм указывает на количественное подобие в накоплении повреждаемости на низких и высоких частотах нагружения.

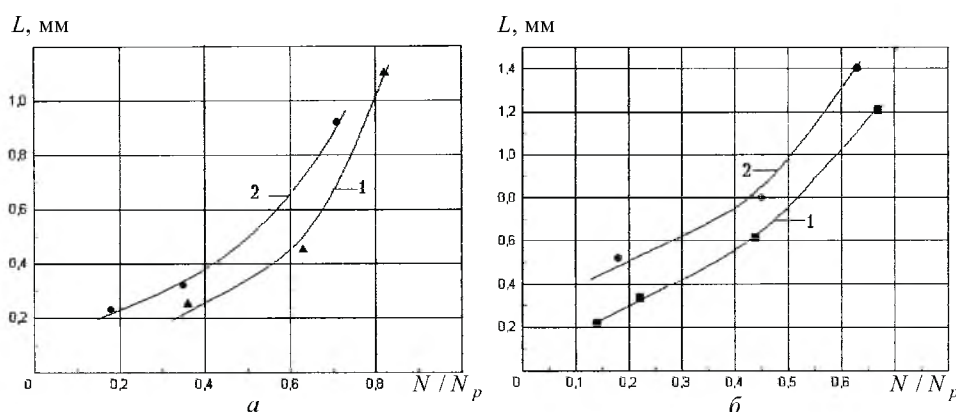


Рис. 5. Зависимость длины усталостной трещины на поверхности образцов из сплавов 01570 (а) и ПТ7М (б): 1 –  $f = 100$  Гц; 2 –  $f = 10000$  Гц.

## Выводы

1. Экспериментально установлена возможность анализа процессов формирования и развития трещин при высокочастотном циклическом нагружении по характеристикам электросопротивления дефектного участка материала.

2. Показана применимость предложенной методики исследования кинетики малых поверхностных трещин при высокочастотных испытаниях на установках электромагнитного и магнитострикционного типа.

3. Обнаружено, что при одинаковом уровне циклических напряжений короткие усталостные трещины длиной 0,1...0,2 мм формируются раньше (относительно числа циклов до разрушения) при более высокой частоте нагружения.

## Резюме

Для випадку циклічного навантажування у діапазоні частот 100...10000 Гц запропоновано методику дослідження поширювання малих тріщин за допомогою розробленої системи вимірювання реакції дефектної ділянки металу на дію високочастотного електромагнітного поля. Представлено підходи до

створення вимірювального комплексу для визначення довжини малих поверхневих тріщин, що розвиваються від завданого початкового дефекту, а також сформульовано вимоги до вибору геометричних параметрів початкового концентратора. Виявлено, що за однакового рівня циклічних напружень малі утомні тріщини розміром 0,1...0,2 мм формуються раніше (відносно кількості циклів до руйнування) при більш високій частоті навантажування.

1. Kawagoishi Norio, Wang Xishu, Nisitani Hironobu, et al. Prediction of fatigue life based on small crack growth law // Nihon kikai gakkai ronbunshu. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A. – 1997. – **63**, N 613. – P. 1869 – 1873.
2. ДСТУ 3002-95. Методи випробувань матеріалів на втому високочастотним осьовим навантаженням / Писаренко Г. Г., Матохнюк Л. С., Чушко В. М. та ін. – Київ, 1995. – 24 с.
3. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
4. Varvani-Farahani A., Topper T. H., Plumtree A. Confocal scanning laser microscopy measurement of the growth and morphology of microstructurally short fatigue cracks in Al 2024-T351 alloy // Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct. – 1996. – **19**, N 9. – P. 1153 – 1159.
5. Nahm S. H., Lee H. M., Suh C. M., Kee S. S. Measurement of small surface fatigue cracks by remote measurement system // J. Mater. Sci. Lett. – 1996. – **15**, N 5. – P. 422 – 424.
6. Чаплыгин В. Н., Абабков Г. В. Электромагнитный метод обнаружения и регистрации роста усталостных трещин // Вопр. авиац. науки и техники. – 1995. – № 1. – С. 241 – 246.
7. Schlums D. H., Dual J. High resolution crack growth measurements in vibrating beams // Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct. – 1997. – **20**, N 7. – P. 1051 – 1058.
8. Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
9. Василюк И. М. Вихретоковый индикатор дефектов ВИД-01 // Сварщик. – 1998. – № 3. – С. 17.
10. Murakami Y., Endo M. Effects of hardness and crack geometries on  $\Delta K_{th}$  of small cracks emanating from small defects // The behavior of short fatigue cracks. – London, 1986. – P. 275 – 293.

Поступила 01. 04. 99