

# Молекулярно – кинетические процессы и принципы создания оптоэлектронных датчиков для регистрации усталости

Т.В. Ларина, В.А. Жмудь, Б.Н. Рахимов

**Аннотация.** В статье рассмотрены принципы создания оптоэлектронных датчиков для регистрации усталости.

**Ключевые слова:** твердые материалы, усталость материала, оптоэлектронные датчики.

Различные твердые материалы, подвергающиеся воздействию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших значений предела прочности, а иногда и предела пропорциональности материала. Явление разрушения под действием переменных напряжений называется усталостью материала.

Процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин и разрушению детали, называется усталостным разрушением (усталостью). Накопление повреждений идет особенно интенсивно, если амплитуды напряжения меняются не только по величине, но и по знаку.

Материал состоит из связанных между собой кристаллов, между которыми имеются поры и разнообразные включения.

Механизм усталостного разрушения связан с неоднородностью материала: различных размеров и конфигураций отдельных зерен, направлением их кристаллографических плоскостей, наличием неоднородных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки (вакансий, дислокаций), остаточных напряжений.

Кристаллы, как правило, анизотропны. Однако поликристаллические материалы, состоящие из большого числа различно ориентированных кристаллов (зерен), проявляют свойства изотропии. Если же в ориентации зерен наблюдается упорядоченность, вызванная специальной обработкой, например, прокаткой металла, его протяжкой и т.п., то материал будет проявлять анизотропные свойства.

Известно [1], что некоторые типы алюминиевых сплавов, находящиеся под усталостной нагрузкой при смачивании жидким галлием довольно быстро (в течение 10 минут) ломаются. Однако природа этого процесса все еще не вполне ясна.

Между тем при растекании жидкости масса ее молекул, оказавшихся в поверхностном слое разуплотняется, увеличиваясь в объеме, с силой равной силе температурного расширения этой жидкости. Чем больше растекается жидкость, тем больше слой разуплотнения.

Принципиально новым является подход к разработке датчиков накопленной усталостной повреждаемости конструкционных материалов [2]. Здесь главной является проблема структурной устойчивости материала. В процессе усталостной эволюции мы не можем считать заданным определенное множество взаимодействующих единиц, или определенное множество преобразований этих единиц. Это означает, что определение системы необходимо модифицировать в ходе эволюции. Такого рода эволюция связана с понятием структурной устойчивости. Речь идет о реакции заданной системы на введение новых единиц, способных размножиться и вовлечь во взаимодействие различные процессы, протекающие в системе.

Проблема устойчивости системы относительно изменений такого типа сводится к следующему. Вводимые в небольшом количестве в систему новые составляющие приводят к возникновению новой сети реакций между её компонентами. Новая сеть реакций начинает конкурировать со старым способом функционирования системы. Если система структурно устойчива относительно вторжения новых единиц, то новый режим функционирования не устанавливается, а сами новые единицы погибают. Но если структурные флуктуации успешно «приживаются» (например, если новые единицы размножаются достаточно быстро и успевают «захватить» систему до того, как они погибнут), то вся система перестраивается на новый режим функционирования: её активность подчиняется новому «синтаксису».

Важной в эволюционной теории усталости является возникающая в итоге обратная связь между макроскопическими структурами и микроскопическими событиями: макроскопические структуры, возникая из микроскопических событий, должны были бы в свою очередь приводить к изменению в микроскопических механизмах. Такие взаимосвязанные процессы порождают очень сложные ситуации, и это обстоятельство необходимо сознавать, приступая к их моделированию.

В данной работе рассматривается влияние на усталость и охрупчивание молекулярно кинетического процесса разуплотнения поверхностного слоя жидкого галлия, растекающегося нанопором в пространстве образцов алюминиевых сплавов. И предлагается оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов, содержащих шесть

самостоятельных схожих ветвей (цепочек).

Второй из механизмов заключается в понижении при образовании сплавов замещения силы трения, препятствующей движению дислокаций. Этот процесс может быть обусловлен рядом эффектов [3, 4]:

- а) нарушением строения ядра подвижных дислокаций атомами растворенной примеси;
- б) изменением параметров расщепления ядра винтовых дислокаций;
- в) изменением упругой постоянной матрицы, изменением электронной структуры [5 - 7];
- г) стимулированием образования двойных перегибов на дислокациях [4].

Третий механизм связывают с возрастанием плотности подвижных дислокаций благодаря вызываемому внедренными атомами поперечному скольжению дислокаций. Поперечное скольжение в свою очередь может способствовать увеличению числа источников размножения дислокаций [3], облегчая процесс течения вещества. Пока нет единой точки зрения на процессы, определяющие размягчение кристаллов. Возможно, что реализация каждого из механизмов зависит от конкретных условий опыта. У чистых кристаллов сплава *Ta-Re* или быстро охлажденных кристаллов *Ta-Re-N* размягчение отсутствует. У медленно охлажденных кристаллов *Ta-Re-N* оно есть [10]. Авторы [10] предполагают, что при медленном охлаждении сплава рений успевает извлекать из раствора азот, что вызывает снижение сопротивления деформации. Аналогичный эффект найден у сплава *Nb-Mo* [5].

Работа [4] посвящена исследованию размягчения металлов группы *YIa* (*Cr, Mo, W*) добавками рения. Существует два механизма размягчения металлов рением:

- 1) у тантала предполагают процесс очистки матрицы от азота;
- 2) в *Cr, Mo, W* – влиянием на барьер Пайерлса.

Авторы [4, 5] ставили своей целью изменение электронной структуры хрома и механизма деформации легированием хрома элементами *YIa* и *YII* групп периодической системы. Они считают, что при таких присадках напряжение Пайерлса должно снижаться в связи с ослаблением гомеоплярного компонента межатомных сил [7]. Для изменения неблагоприятной электронной структуры, обеспечивающей высокий уровень напряжений Пайерлса у металлов *YIa* группы, требуется легирование такими элементами, в результате которого электронная концентрация сплава обычно превышает  $6,3 \text{ э/а}$ .

Суммарным влиянием катионных примесей, введенных в расплав, и анионных, введенных при отжиге на воздухе, предел текучести *Cr* может быть увеличен почти в 180 раз. Опыты с ионными кристаллами подкрепляют первый упомянутый механизм ПРК локальной очисткой объема кристалла. Размягчение синтетического кварца наблюдается при деформации образцов, нагреваемых выше  $550^\circ\text{C}$ .

Увеличение числа подвижных дислокаций может происходить как под влиянием образования

более слабых (по сравнению с *Si-O*) водородных связей, так и от действия концентрации напряжений, вызываемой водными включениями.

В работе анализируется частотная зависимость акустического импеданса образцов алюминиевого сплава, смоченных жидким галлием. Это позволило выявить степень механической неоднородности сплава. Показано, что для различных моментов времени после смачивания жидким галлием, характер механической неоднородности меняется и сильно зависит от ионного радиуса входящих в состав алюминиевого сплава *Cu, Mn, Mg, Si* и *Li*.

В связи этим возникает актуальность в разработке неразрушающего оптоэлектронного метода контроля накопленных усталостных повреждений на первом этапе разрушения, позволяющего контролировать твердые материалы, причем как в процессе эксплуатации, так и при техническом обслуживании. Метод так же должен сочетать высокую локальность контроля, позволяющую выявлять очаги будущего разрушения, простоту средств контроля и их применения, с целью его использования при технической диагностике до начала трещинообразования. В работах [6 – 15] описаны конструкции анализатора цвета поверхности твердых материалов и оптоэлектронного устройства для определения усталости твердых материалов.

Использование функциональной развертки в такте фоторезистора (ФР) является перспективным для создания оптрона открытого канала (ООК). На рис.1 приведена упрощенная схема ООК для контроля цвета твердых материалов.

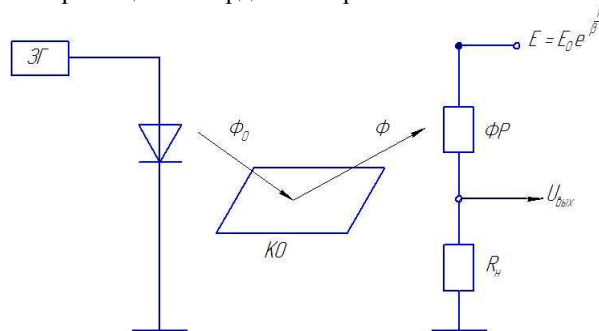


Рис. 1. ЗГ – задающий генератор, СИД – светодиодный диод, ФР – фоторезистор, КО – контролируемый объект,  $\Phi_0$  – падающий первоначальный поток,  $\Phi$  – отраженный от КО

В данном устройстве можно линеаризовать характеристики  $\Phi$  за счет введения функциональной развертки. Величина сопротивления ФР связана однозначной зависимостью с измерительным параметром объекта и нагруженного резистора  $R_n$ , с которого снимается выходной сигнал в виде напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Амплитуда  $U_{\text{вых}}$  изменяется во времени по закону, обратному закону передаточной характеристики измерительного преобразователя. Далее можно определить момент равенства первичного измерительного преобразователя (ПИП) постоянному фиксированному значению  $U_{\text{пор}}$ .

Как известно [16, 17] передаточная характеристика ФР с достаточной характеристикой

ФР с достаточной точностью аппроксимируется степенной зависимостью, сопротивления фоторезистора:

$$R_{\Phi} = \frac{1}{A\Phi^{\alpha}}, \quad (1)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент;  $\alpha$  – показатель степени.

При этом  $U_{\text{вых}}$  ПИП можно записать

$$U_{\Phi} = E \frac{R_H}{R_H + R_{\Phi}}, \quad (2)$$

где  $E$  – напряжение питания;  $R_H$  – сопротивление измерительного резистора.

Если соблюдается  $R_H \ll R_{\Phi}$  [2] можно записать

$$U_{\Phi} = E \frac{R_H}{R_H + R_{\Phi}} = ER_H A\Phi^{\alpha}. \quad (3)$$

Как видно из этого выражения выходные напряжение  $U_{\text{вых}}$  нелинейно зависит от интенсивности потока излучения.

Если считать, что интенсивность отраженного излучения связана линейной зависимости с параметром контролируемой поверхности, то можно записать

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kn}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – отраженный поток;  $\Phi_0$  – падающий поток;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $n$  – величина характеризующая параметры твердых материалов.

Тогда, поставив (3) в (2) имеем

$$U_{\Phi} = ER_H A\Phi^{\alpha} e^{-kn}. \quad (5)$$

Для линеаризации характеристики данного оптрона открытого канала следует изменять напряжения питания по закону

$$E = E_0 e^{-\tau/\beta}, \quad (6)$$

где  $E_0$  – начальное значение напряжения при  $\tau = 0$ ;  $\beta$  – постоянная времени экспоненциального импульса.

Поставим (6) в (5) получим

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}} &= AR_H \Phi_0^{\alpha} e^{-k\alpha n} E_0 e^{-\tau/\beta} = \\ &= AR_H \Phi_0^{\alpha} E_0 e^{-\tau/\beta - k\alpha n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решим (7) относительно времени  $\tau$ :

$$\frac{\tau}{\beta} = k\alpha n + \ln \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{AR_H \Phi_0^{\alpha} E_0}. \quad (8)$$

Учитывая, что  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПОР}} = \text{const}$  и

$AR_H \Phi_0^{\alpha} E_0 = \text{const}$ , обозначая  $k^* = k\alpha\beta$  и

$$\begin{aligned} c &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{AR_H \Phi_0^{\alpha} E_0}, \text{ получим} \\ t &= k^* n + c \end{aligned} \quad (9)$$

Последнее выражение показывает, что длительность интервала времени  $t$  от начала приложения к измерительному преобразователю напряжения питания, которое изменяется во времени по экспоненциальному закону до достижения его результата с выходным сигналом определенного

фиксированного уровня  $U_{\text{ВЫХ}}$ , линейно определяется величиной или иным параметром твердого материала.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shamirzaev S. (1996) Adaptive forecast of fatigue damage of aviation design with the help of HS-CFM. Proceedings for the adaptive distribute parallel computing symposium. Dayton (Fairborn), Ohio, USA, August 8-9, 1996, pp. 344-354.
- [2] S. Kh. Shamirzaev. N.R.Rakhimov The theory of output parameters of a pressing powder mixture with random packaging density // Solid State Sciences, vol.6, Issue10 oct., 2004 pp. 1125-1129.5.
- [3] Shamirzaev S. and Shamirzaeva G. (2000) The rheological model of fatigue damage of CM. Proceedings of the XIIIth International Congress on Rheology. Cambridge, United Kingdom, 20th to 25th August, 2000. Published by the British Society of Rheology. Volume 3, pp. 377-379
- [4] Shamirzaev S. (2000) Modeling of a fatigue imperfection of structural materials. Poster session abstract. International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials III; September, 17 – 22, 2000, Hyannis, Massachusetts, USA. P.1., pp. 5-6.
- [5] Shamirzaev S., Ganihanov Sh., Shamirzaeva G. (2001) The monitoring of fatigue features of CM for a very high cycles of loads. Proceedings of the International Conference on Fatigue in the Very High Cycle Regime. 2-4 July, 2001. Vienna, Austria, pp. 245-252.
- [6] Анализатор цвета поверхности твердых материалов. Приборы и техника эксперимента. Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова 2012. - № 3, С. 131-132.
- [7] Пат. №2429456 Российская Федерация, МПК 51G01J 3/46 Анализатор цвета поверхности твердых материалов/Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - № 2009147534/28; заявл. 21.12.2009; опублик. 20.09.2011 Бюл. № 26. - 7 с.: 3 ил.
- [8] Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, М.П. Исаев. Оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов. Решение о выдаче патента на изобретение от 06.02.2013 № 2012101558/28(002116) от 17.01.2012 г.
- [9] Ушаков, О.К. Физические основы применения оптоэлектронного метода с использованием световодов для контроля качественных параметров металлических поверхностей / О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, Е.Ю. Кутенкова, В.А. Плиско // ГЕО – Сибирь - 2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2010», 19 - 29 апреля 2010 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2010. – Т.5., ч.1. – С. 179 – 185.
- [10] Ларина, Т. В. Исследование оптрона открытого канала для контроля качественных параметров металлических поверхностей // ГЕО – Сибирь - 2011: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2011», 19 - 29 апреля 2011 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2011. – Т.5., ч.1. – С. 120 – 125.
- [11] Ларина, Т. В. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций // ГЕО – Сибирь – 2012: сб. материалов VIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2012», 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб.

материалов в 2 т. Т.1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 111–115.

[12] Оптоэлектронный метод анализа физико-химических параметров нефти и нефтепродуктов/ Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина, П.В. Петров, Ш.И. Мадумаров// ГЕО – Сибирь - 2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2010», 19 - 29 апреля 2010 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2010. – Т.5., ч.1. - С. 173 – 179.

[13] Рахимов, Н.Р. Расчет основных параметров приемников оптического излучения для создания оптрона открытого канала/ Н.Р. Рахимов, Ларина Т.В., Сатволдиев И.А. // Интерэкспо ГЕО – Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10 – 20 апреля 2012 г. Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб. материалов в 2 т. Т.1. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 132 - 137.

[14] Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова // Приборы и техника эксперимента. - 2012. - № 3. - С. 131 – 132.

[15] Оптоэлектронный автоматический колориметр / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Е. Ю. Кутенкова, Т. В. Ларина // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - № 5. - С. 161 – 162.

[16] М. Мухитдинов, Э.С. Мусаев. Светоизлучающие диоды и их применение. – М.: Радио и связь, 1988. – 78 с.

[17] Я. Суэмачу, С. Катаока и др. Основы оптоэлектроники / пер. с яп. – М.: Мир, 1988. – 288 с.

**Ларина Татьяна Вячеславовна**,  
доцент, ФГБОУ ВПО «СГГА», каф.  
ТОП, e-mail: [larina\\_t\\_v@mail.ru](mailto:larina_t_v@mail.ru)



**Вадим Аркадьевич Жмудь** –  
заведующий кафедрой Автоматики  
НГТУ, профессор, доктор технических  
наук, автор более 200 научных статей,  
включая 10 патентов и 6 учебных  
пособий. Область научных интересов и  
компетенций – теория автоматического  
управления, электроника, лазерные  
системы, оптимизация, измерительная  
техника.

E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Бахтиёржон Нематович Рахимов**,  
Старший научный сотрудник (докторант)  
кафедры Устройства и системы  
радиосвязи Ташкентской университет  
информационной технологий, автор  
более 30 научных трудов в т.ч. 4  
изобретений. Область научных интересов  
и компетенций – оптоэлектронное  
приборостроение, оптимизация,  
многофункциональные системы.

E-mail: [brah2008@rambler.ru](mailto:brah2008@rambler.ru)