

УДК 621.01/.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО ПОКАЗАНИЯМ ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА ПЕРЕМЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Сызранцев Владимир Николаевич¹,
v_syzrantsev@mail.ru

Сызранцева Ксения Владимировна¹,
kv.syzr@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность работы. Сокращение сроков создания и освоения производства новых образцов машин, повышение их надежности и долговечности являются важнейшими задачами на любом этапе развития машиностроения. Период доработки изделий может быть сокращен с помощью экспериментальных методов, которые позволяют на ранних стадиях испытаний установить характер распределения циклических напряжений (деформаций) на исследуемых поверхностях деталей, оценить их работоспособность и усталостную прочность. Возможности экспериментальных методов существенно расширяются при использовании для оценки уровня циклических напряжений датчиков деформаций интегрального типа, изготавливаемых из фольги со специальными свойствами. Накопленный опыт применения этих датчиков свидетельствует, что с их помощью решается широкий спектр задач по определению характера изменения напряжений на поверхностях деталей и несущих систем машин, восстановлению закона распределения напряжений и определению эквивалентных напряжений, оценке мест и сроков вероятного разрушения деталей в процессе стеновых и эксплуатационных испытаний машин. В то же время реализация разработанных методов применения датчиков деформаций интегрального типа в процессе эксплуатации изделий выявила ряд проблем, связанных как с мониторингом реакции датчиков, так и неопределенностью продолжительности испытаний, вследствие наличия у датчиков инкубационного периода до появления на них реакции. Важнейшей задачей прогнозирования долговечности деталей, металлоконструкций машин, нефтегазопроводов, подвергаемых в условиях эксплуатации случайному спектру циклического деформирования, является оценка накопленных усталостных повреждений металла. Решение данной задачи требует разработки моделей, связывающих реакцию на датчиках деформаций интегрального типа с уровнем повреждений, получаемых датчиками в процессе их деформирования на изделиях.

Цель исследования: для решения задач прогнозирования ресурса деталей машин, нефтегазопроводов разработать методики: измерения напряжений, расчета эквивалентных напряжений и эквивалентных чисел циклов нагружения по повреждающему воздействию на основе применения датчиков деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью к амплитуде циклического нагружения, не имеющих инкубационных периодов, позволяющих регистрировать реакцию датчиков в любой момент испытаний изделия.

Методы исследования: кинетическая теория механической усталости, численные методы решения трансцендентных уравнений, сопротивление материалов.

Результаты: Рассмотрена технология изготовления датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью. Для рабочей части датчика, на которой реакция на нем отсутствует, на основе кинетической теории механической усталости определено изменение накопленных повреждений, полученных в процессе предварительной наработки датчика. Решены задачи определения напряжений и прогнозирования медианного числа циклов до разрушения детали по показаниям датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью. Для условий работы детали при блочном режиме нагружения по реакции датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью решены задачи определения эквивалентного по повреждающему воздействию напряжения и эквивалентного по повреждающему воздействию чисел циклов деформирования.

Ключевые слова:

Датчики деформаций интегрального типа, переменная чувствительность, кинетическая теория механической усталости, циклические напряжения, усталостные повреждения, эквивалентные напряжения, долговечность.

Датчики деформаций интегрального типа и их применение для оценки нагруженности и долговечности деталей и несущих конструкций машин

При оценке технического состояния изделий в процессе эксплуатации важнейшей задачей является определение их остаточного ресурса. Решение этой задачи выполняется на основе кривой усталости (кривой Веллера) [1], аппроксимирующей результаты испытаний образцов на долговечность по числу циклов деформирования (N) до разрушения при различных, но постоянных для каждого образца, амплитудах напряжений (σ_a). Для описания кривых усталости традиционно используются

удобные с позиций обработки экспериментальных данных степенные зависимости [1–4]. При этом предполагается, что за каждый i -й цикл деформирования образец получает повреждение $D_i=1/N$, а поломка образца происходит по достижении ве-

личины повреждения $a_N = \sum_{i=1}^N D_i = 1$. В то же время

обработка результатов усталостных испытаний свидетельствует, что фактическая величина a_N от единицы может отличаться на три порядка ($0,01 \leq a_N \leq 10$) [2]. С целью приближения результатов экспериментов к расчетным данным прогнозирования ресурса на основе кривой Велера исполь-

зуются регрессионные зависимости, корректирующие a_N [1, 3], либо значение a_N принимается [5] равным 0,3 (из предположения о распределении a_N по нормальному закону со средним значением $\bar{a}_N=1$ и среднеквадратическим отклонением равным 0,3), что соответствует левой границе 95 % доверительного интервала разрушения образцов.

При эксплуатации изделий возникающие в них напряжения во времени изменяются либо в соответствии с блоком нагружения, либо представляют собой процесс случайный [1–5]. В настоящее время для регистрации в процессе работы изделий напряжений в подавляющем большинстве случаев используются тензорезисторы [6], реализующие дифференциальный способ измерения. Несмотря на отработанную технологию изготовления тензорезисторов, удобство получения с их помощью информации о возникающих на поверхности деталей деформаций, тензорезисторы имеют ряд недостатков, исключающих их использование при экспериментальном исследовании нагруженности и долговечности косозубых цилиндрических передач, передач с зацеплением Новикова, колес планетарных передач в процессе их работы как на стендах, так и в составе приводов машин при их эксплуатационных испытаниях. Поскольку для прогнозирования ресурса деталей в условиях случайного спектра нагружения кривая усталости непосредственно использоваться не может, на основе зафиксированного с помощью тензорезисторов случайного процесса изменения напряжений необходимо определить эквивалентные напряжения (σ_E). Во то же время известные процедуры схематизации случайных процессов (метод размахов, полуциклов, падающего дождя и другие) накопление усталостных повреждений не учитывают, что не позволяет корректно определить величину σ_E . Аналогичная ситуация имеет место и при установлении величины эквивалентного числа циклов (N_E) при случайном спектре нагружения изделия, когда процесс деформирования к гармоническому преобразовать возможным не представляется.

Проблемы определения нагруженности и прогнозирования долговечности деталей и конструкций машин в эксплуатации потребовали, начиная со второй половины прошлого столетия, разработки новых средств регистрации деформаций, обеспечивающих измерение напряжений в условиях циклического деформирования деталей. Наиболее эффективные результаты получены в двух направлениях. Первое направление связано с использованием тензорезисторов, материал которых подвергается отжигу (способ запатентованный специалистами фирмы Боинг). Такие тензорезисторы (датчики усталостных повреждений, $S-N$ датчики [4, 7, 8]) изменяют свое омическое сопротивление по мере циклического деформирования. Проблемой использования этих датчиков при оценке напряжений (при случайном характере нагружения) и прогнозирования ресурса, не решенной до на-

стоящего времени, несмотря на усилия ученых различных стран, является отсутствие математических моделей, связывающих накопленные усталостные повреждения в материале детали с изменением омического сопротивления датчика.

Основой второго направления можно считать работу [9], в которой для определения напряжений, возникающих на поверхности детали при ее циклическом деформировании, использованы медные или никелевые гальванические покрытия. На поверхности покрытия в процессе деформирования возникает реакция в виде «темных пятен», относительная площадь которых и момент появления коррелируют с числом циклов и амплитудой напряжений. Для прочного соединения с деталью процесс осаждения покрытий выполнялся с использованием цианистых электролитов, при этом реакция на покрытии возникала через несколько миллионов чисел циклов деформирования. Разработанные методы использованы при определении циклических напряжений на поверхностях деталей [10–13].

Поскольку за счет разницы потенциалов на границе сцепления гальваническое покрытие снижает долговечность деталей, прогнозировать их ресурс на основе обработки реакции покрытия не представляется возможным. В процессе развития данного направления вместо гальванического покрытия предложено использовать датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ), вырезаемые требуемой конфигурации из электроосажденной фольги [14–16] и помещаемые (наклеиваемые) на исследуемое место детали. Для получения медной фольги использовались менее токсичные серноокислые электролиты [14]. Путем варьирования параметров электролиза и термической обработки фольги удалось до 30 % сократить число циклов деформирования до реакции ДДИТ [14, 16]. Помимо оценки реакции ДДИТ по моменту возникновения на поверхности датчика первых «темных пятен» предложены и другие способы [14, 17–19], разработаны и реализованы методики определения циклических напряжений для различных деталей и конструкций машин [10, 11, 14, 17, 20].

Сократить на два–три порядка число циклов деформирования деталей при определении амплитуды напряжений позволили ДДИТ, изготовленные на основе алюминиевой фольги, подвергнутой специальной термомеханической обработке [21–24]. В нашей стране исследованием свойств медных и алюминиевых ДДИТ, разработкой методик их применения для регистрации циклических напряжений и прогнозирования ресурса деталей ведутся с 80-х гг. прошлого столетия. Результаты выполненных исследований отражены в работах [14, 17, 20], в которых описаны различные способы оценки реакции ДДИТ (по первым «темным пятнам», по относительной площади «темных пятен», по изменению микротвердости датчика, по изменению отраженного от поверхности датчика потока инфракрасного излучения), разработа-

ны модели, описывающие тарировочные зависимости. Приведены примеры исследования с помощью ДДИТ характера распределения напряжений в различных деталях и металлоконструкциях машин, определения мест с интенсивным накоплением усталостных повреждений, прогнозирования ресурса несущих систем машин как для условий стендовых, так и эксплуатационных испытаний изделий.

Последнее десятилетие характеризуется расширением исследований свойств ДДИТ, способов обработки информации с датчиков, применением ДДИТ при оценке технического состояния изделий в процессе эксплуатации. В работах [25, 26] на основе теории распознавания образов предложены алгоритмы обработки цифровых снимков реакции на датчиках. Для исследования характера распределения напряжений в сварных образцах и в вершине усталостной трещины разработаны способы тарирования датчиков с использованием результатов расчета напряженно-деформированного состояния образцов методом конечных элементов [27, 28]. С целью определения напряжений при квазистатическом деформировании деталей предложено в качестве материала датчика использовать индиевую или оловянную фольгу [29, 30]. Совершенствуется аппаратура для регистрации реакции ДДИТ по изменению отраженного от поверхности датчика светового потока [31]. Разрабатываются методики определения по показаниям ДДИТ напряжений в процессе эксплуатации транспортных и грузоподъемных машин [32, 33] для оценки нагруженности и ресурса их элементов. В последние годы в Томском политехническом университете под руководством профессора С.В. Панина выполняются исследования по оценке с помощью алюминиевых ДДИТ циклических напряжений в деталях, изготовленных из композитных материалов на основе углеродных волокон [34–39]. Особенности разрушения таких деталей вследствие усталости потребовали разработки специальных устройств по регистрации реакции датчиков, алгоритмов ее обработки с целью получения дополнительных информационных параметров, отражающих различные стадии процесса накопления в композитных материалах усталостных повреждений. Выполняемые исследования ориентированы на создание системы неразрушающего контроля диагностики технического состояния изделий в эксплуатации.

Математическое обеспечение процесса тарирования датчиков деформаций интегрального типа, имеющих переменную чувствительность

Для изготовления вышерассмотренных ДДИТ используется металлическая фольга, чувствительность которой к накопленным усталостным повреждениям, оцениваемая по реакции датчиков, в пределах фольги не меняется. Анализ опыта определения с помощью таких ДДИТ характера распределения напряжений в местах их концен-

трации на различных деталях и металлоконструкциях машин в процессе их эксплуатационных испытаний выявил две проблемы. Первая проблема возникает при реализации ряда методик решения задач, основой которых является фиксация на ДДИТ момента появления первых «темных пятен». Возможность получения такой информации в процессе циклического деформирования изделия является не только процессом трудоемким, требующим многократного осмотра поверхности датчика, но и нередко связанным с необходимостью разборки-сборки изделия с целью обеспечения доступа к датчику. Более того, мониторинг реакции датчиков выполняется только при неработающем оборудовании, однако во многих случаях его остановка в произвольные моменты времени невозможна, поскольку определяется технологическим и техническим регламентами эксплуатации изделия. Если же момент возникновения первых «темных пятен» на ДДИТ не зафиксирован, то реализовать методику восстановления напряжений по показаниям ДДИТ возможным не представляется.

Вторая проблема связана с тем, что в процессе исследования характера распределения напряжений на исследуемой поверхности детали с помощью ДДИТ амплитуда напряжений неизвестна, поэтому априори установить продолжительность циклического деформирования детали до возникновения реакции на ДДИТ возможным не представляется. Если амплитуда мала, то на ДДИТ реакция может вообще не появиться.

Решить проблемы позволяют ДДИТ, изготовленные по технологии, предложенной в работе [40]. Суть ее заключается в следующем. Обратимся к рис. 1, на котором представлена традиционная схема тарирования датчика (по критерию первых «темных пятен»), представляющего собой полосу гальванической фольги, помещенного (наклеенного) на коническую рабочую часть цилиндрического образца. Образец подвергается циклическому деформированию на машине усталостных испытаний (МУИ) в условиях изгиба с вращением.

Целью данного способа тарирования ДДИТ [14, 17] является определение функциональной зависимости числа циклов деформирования (N) от амплитуды напряжений (σ_a) по критерию возникновения на поверхности ДДИТ первых «темных пятен». Фотографии на рис. 1 свидетельствуют, что процесс тарирования близок к завершению, поскольку реакция на ДДИТ занимает порядка 70 % его длины. Отметим, что в процессе циклического деформирования образца с ДДИТ, датчик, как и образец, накапливает усталостные повреждения, величина которых, при возникновении на датчике первых «темных пятен», является постоянной, зависящей от материала ДДИТ и его термомеханической обработки [14, 17]. Следуя работе [40], реализуем только начальную стадию тарирования ДДИТ, соответствующую появлению первых «темных пятен» в зоне минимального диаметра

тра образца. Зафиксируем рискуй на датчике положение границы первых «темных пятен», после чего, растворив клеевую прослойку ДДИТ, снимем его с образца. На этом датчике имеются две зоны, разделенные границей первых «темных пятен». Слева от границы на поверхности датчика реакция присутствует, а справа от границы, в рабочей части датчика, реакция отсутствует, несмотря на то, что в ходе предварительной наработки датчика на образце материал датчика усталостные повреждения получил. Величина накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части датчика является переменной – она уменьшается при удалении вправо от границы. Описанная технология позволяет изготавливать датчик интегрального типа с переменной чувствительностью (ДДПЧ), который имеет ряд, принципиально важных по сравнению с ДДИТ, преимуществ:

- инкубационный период у ДДПЧ отсутствует;
- значительно упрощается процедура фиксации реакции ДДПЧ, заключающаяся в регистрации линейного перемещения границы первых «темных пятен» по длине рабочей части ДДПЧ;
- реакция на ДДПЧ может быть зафиксирована в любой момент процесса испытаний исследуемой детали или металлоконструкции.

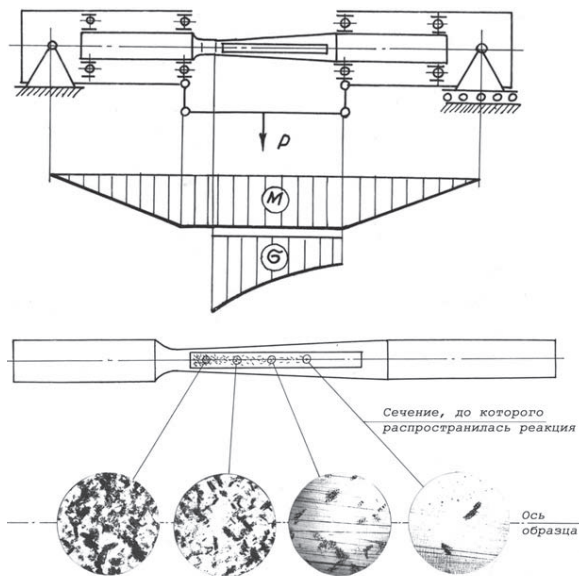


Рис. 1. Тарирование ДДИТ в процессе циклического деформирования образца на машине усталостных испытаний (МУИ)

Fig. 1. Integral Strain Gauge (ISG) calibrating during cyclic deforming of specimen on fatigue testing machine

Выше было отмечено, что в процессе изготовления ДДПЧ материал его рабочей части получает усталостные повреждения. Закон изменения этих повреждений по длине рабочей части датчика определяется геометрией образца, с использованием которого выполняется наработка ДДПЧ, и видом напряженно-деформированного состояния образца в процессе его циклического деформирования.

На рис. 1 показан цилиндрический образец с конической рабочей частью. Нарботка датчиков может осуществляться на плоских образцах в процессе их циклического деформирования в условиях растяжения или изгиба. Используя различную геометрическую форму плоского или цилиндрического образца, можно варьировать величину накопленных усталостных повреждений материала ДДПЧ и ее изменение в пределах его рабочей части.

Рассмотрим задачу определения функциональной зависимости изменения накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части ДДПЧ, являющейся для этих датчиков калибровочной зависимостью. Известно [1, 3, 5], что наиболее достоверным способом получения информации об усталости материала является построение кривой усталости (кривой Велера). Традиционно математически кривая Велера описывается степенной зависимостью [1, 3, 5], не имеющей физического наполнения, но позволяющей эту кривую в плоскости параметров $\sigma_a - \lg N$ или $\lg \sigma_a - \lg N$ представить в виде прямой линии и определять ее параметры методом линейного регрессионного анализа.

Другим подходом к описанию кривых усталости является использование полуэмпирических моделей [1, 41, 42]. Несмотря на более высокую их сложность и, как правило, необходимость использования численных методов при определении значений параметров моделей, они позволяют рассчитывать величину повреждения материала при его циклическом деформировании. В настоящей работе для решения задачи воспользуемся полуэмпирическими моделями, разработанными в рамках кинетической теории механической усталости [2, 41, 42], на основе которой для кривой малоциклового усталости получено следующее выражение [2]:

$$N = (1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{9}}) Q_T B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_a)], \quad (1)$$

где

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b};$$

$$\tilde{N}_0 = - \frac{\bar{\sigma}_b}{(\sigma_R - \sigma_{RT})(\sigma_b - \sigma_R)}; \quad A_0 = D / (1 - D);$$

Q_T – коэффициент, характеризующий сопротивление детали росту усталостных трещин; σ_R – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла R ; σ_{RT} – циклический предел текучести; $\bar{\sigma}_b$ – среднее значение предела прочности материала; ϑ – угол наклона кривой усталости в системе координат $\lg N - \sigma_a$; D – величина поврежденности материала от $D = D_0 \geq 0$, характеризующей начальное повреждение материала образца, которое имеет место еще до начала его циклического деформирования, вплоть до предельной величины $D = D_i \leq 1$, соответствующей разрушению образца вследствие накопленных усталостных повреждений.

Методики определения входящих в уравнение (1) параметров: Q_T^* , σ_R^* , σ_{RT}^* , ϑ^* , $D=D_0$ на основе данных σ_{ai} , N_i , $i=1, n$ испытаний образцов на долговечность и определенной в результате разрушения образцов на разрывной машине величины $\bar{\sigma}_b$ изложены в работе [2]. На момент решения поставленной задачи считаем, что параметры уравнения (1) являются известными.

Возвратимся к процессу изготовления ДДПЧ на МУИ (рис. 1) путем предварительной наработки датчика на конической рабочей части тарировочного образца. Подвергнем образец с ДДИТ циклическому деформированию в течение N_g числа циклов, до момента возникновения в левой части датчика (рис. 1) реакции в виде «темных пятен», и зафиксируем диаметр d_g сечения конической рабочей части тарировочного образца, соответствующего границе первых «темных пятен». В этом сечении образца действовало напряжение σ_{ag} .

Рассчитаем величину поврежденности материала образца D_g в его сечении, определяемом диаметром d_g . Воспользуемся выражением (1) при $N=N_g$ и $\sigma_a=\sigma_{ag}$. Учитывая, что в данном случае $D_g=D_0+D$, в уравнении (1) остается лишь одно неизвестное – D_g . Для его определения обозначим:

$$E_0 = (\sigma_{ag})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}}{P_0 Q_T^* B_0} \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$P_0 = 1 - 10^{(\sigma_{ag} - \bar{\sigma}_b) / \vartheta^*},$$

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*}{\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b},$$

$$\tilde{N}_0 = - \frac{\bar{\sigma}_b}{(\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*)(\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*)},$$

$$N_{gn} = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{ag} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{ag})] - N_g,$$

$$A_0 = D_0 / (1 - D_0),$$

с учетом которых получим выражение для расчета величины D_g :

$$D_g = D_0 + E_0 / (E_0 + C_0). \quad (3)$$

Рассмотрим задачу расчета поврежденности материала образца D_x в сечениях его рабочей части, определяемых диаметром $d_x > d_g$. Для описания этих сечений введем продольную координату x_g для датчика: в сечении $x_g=0$, в сечении d_x величина $0 < x_g \leq L$, где L – длина рабочей части датчика. Поскольку тарировочный образец имеет коническую форму, накопленные повреждения в сечениях его рабочей части, определяемые координатой $0 < x_g \leq L$, будут переменными, то есть величина D_x является функцией от x_g : $D_x(x_g)$.

Из рис. 1 следует, что диаметр рабочей части образца в сечении d_x рассчитывается по зависимости:

$$d_x = 2 \operatorname{tg} \alpha x_g + d_g, \quad (4)$$

а действующее в сечении d_x напряжение σ_{ax} по формуле:

$$\sigma_{ax}(x_g) = 32M / (\pi d_x^3), \quad (5)$$

где α – угол конуса рабочей части тарировочного образца; M – изгибающий момент, при котором образец подвергается циклическому деформированию на МУИ.

Для определения зависимости $D_x(x_g)$ – поврежденности материала образца в любом его сечении, определяемом координатой $x_g = \text{const}$, аналогично формулам (2) и (3), учитывая (4) и (5) – получим выражения:

$$D_x(x_g) = D_0 + E_0(x_g) / [E_0(x_g) + C_0], \quad (6)$$

где

$$E_0(x_g) = [32M / (\pi d_x^3)]^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}(x_g)}{P_0(x_g) Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_0(x_g) = 1 - 10^{[32M / (\pi d_x^3) - \bar{\sigma}_b] / \vartheta^*};$$

$$N_{gn}(x_g) =$$

$$= \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{ax}(x_g) - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{ax}(x_g))] - N_g.$$

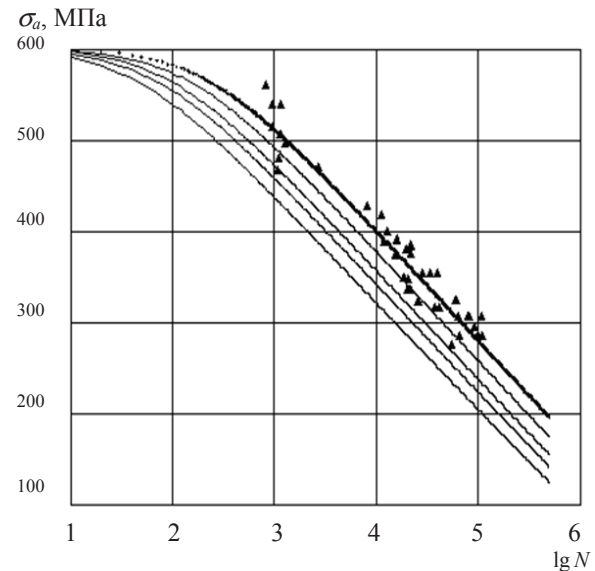


Рис. 2. Медианная кривая малоциклового усталости с различной величиной поврежденности материала

Fig. 2. Median curve of low-cycle fatigue at different values of material damage

Описанную технологию изготовления и тарирования ДДПЧ проиллюстрируем на следующем примере. Обратимся к работе [2], в которой представлены данные испытаний образцов из трубной стали на малоцикловую усталость. Результаты ис-

питаний (темные треугольники) в плоскости параметров $\lg N - \sigma_a$ отражены на рис. 2, на котором также показана медианная кривая усталости (толстая линия), построенная на основе модели (1).

Параметры модели (1), описывающие данные испытаний (рис. 2), имеют значения: $\sigma_b = 602,1$ МПа; $Q_T^* = 1,53 \cdot 10^6$; $\sigma_R^* = 263,621$ МПа; $\sigma_{RT}^* = 201,914$ МПа; $\vartheta^* = -121,811$; $D_0 = 6,006 \cdot 10^{-11}$.

В процессе циклического деформирования детали ее материал накапливает усталостные повреждения (учитываемые в модели (1) параметром D : $D_0 \leq D \leq D_k \leq 1$), приводящие к смещению медианной кривой усталости в сторону меньшего числа циклов нагружения до поломки образцов. В качестве иллюстрации на рис. 2 показаны медианные кривые малоциклового усталости (справа налево), рассчитанные по выражению (1) при различных величинах D : $D_0 = 6,006 \cdot 10^{-11}$ (1/цикл) (исходная поврежденность материала), 10^{-7} ; 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} (1/цикл).

Для изготовления ДДПЧ воспользуемся тарировочным образцом с конической рабочей частью (рис. 1), имеющим угол $\alpha = 0,5^\circ$, на которую наклеим ДДИТ в виде полоски из алюминиевой фольги. Осуществим процесс наработки датчика на МУИ при величине $M = 3,682 \cdot 10^3$ Н·М в течение $N_g = 5000$ чисел циклов деформирования. В результате циклического деформирования ДДИТ на его поверхности в сечении образца диаметром $d_g = 5$ мм зафиксирована реакция в виде первых «темных пятен». На основании формулы (5) в этом сечении действовало напряжение $\sigma_a = 300$ МПа. Величину поврежденности материала образца D_g , соответствующую на поверхности датчика границе первых «темных пятен», рассчитаем по выражению (3): $D_g = 3,496 \cdot 10^{-10}$ (1/цикл). Зависимость $D_x(x_g)$ изменения поврежденности ДДПЧ в пределах его длины $L = 20$ мм определяется уравнением (6) с учетом (4) и (5) при варьировании x_g в диапазоне $0 < x_g \leq L$. Вид полученной зависимости $D_x(x_g)$ показан на рис. 3.

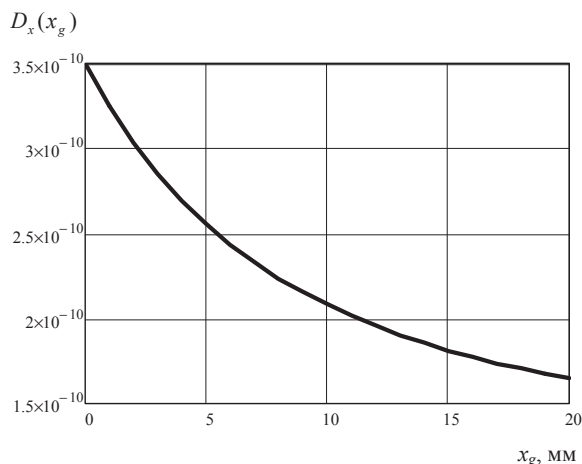


Рис. 3. Изменение поврежденности по длине ДДПЧ

Fig. 3. Change of damage in VSISG length

Методики определение напряжений и прогнозирования долговечности на основе показаний датчиков деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью

Основой методик определения напряжений, возникающих в трубопроводах и металлоконструкциях машин, подвергающихся при эксплуатации циклическому деформированию, с использованием ДДИТ является тарировочная зависимость, связывающая амплитуду напряжений и число циклов нагружения, построенная по критерию появления на поверхности датчика первых «темных пятен» [14, 17]. Тарировочная зависимость ДДПЧ (рис. 3) по величине x_g смещения границы первых «темных пятен» на рабочей части датчика позволяет установить величину поврежденности $D_x(x_g)$, а не амплитуду напряжений σ_a . Для определения по реакции ДДПЧ амплитуды напряжений, прогнозирования долговечности трубопровода необходимо специализированное методическое обеспечение, рассматриваемое далее.

Методика 1 определения с помощью описанного в п. 2 ДДПЧ амплитуды напряжения σ_a на участке поверхности трубопровода в процессе его циклического деформирования из условия, что за число циклов $N_d = 1000$ граница первых «темных пятен» на поверхности ДДПЧ сместилась на величину $x_g = 12$ мм. Кривая усталости материала трубы (рис. 2), связывающая число циклов до ее разрушения $N(\sigma_a)$ с амплитудой напряжения σ_a , при которой осуществляется циклическое деформирование трубы, на основании выражения (1) имеет вид:

$$N(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \sigma_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_a)], \quad (7)$$

где $A_0 = D_0 / (1 - D_0)$.

Величина поврежденности $D_x(x_g)$ рабочего участка ДДПЧ в любом его сечении, задаваемом продольной координатой x_g , представлена на рис. 3. Определим поврежденность $D_x(x_g)$ при $x_g = 12$ мм, которую должен получить датчик через N_d число циклов деформирования вместе с трубопроводом, чтобы в этом сечении датчика возникли первые «темные пятна». Воспользовавшись зависимостями (4)–(6), при $x_g = 12$ мм последовательно вычислим:

$$d_{gx} = 2 \operatorname{tg} \alpha x_g + d_g; \quad \sigma_{gx} = 32M / (\pi d_{gx}^3); \quad (8)$$

$$N_{gx} = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{gx} - \sigma_b}{\vartheta^*}} \right) \times Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{gx})] - N_g - N_d; \quad (9)$$

$$P_{0x} = 1 - 10^{[\sigma_{gx} - \sigma_b] / \vartheta^*};$$

$$E_{0x} = [\sigma_{gx}]^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}}{P_{0n} Q_T^* B_0} \right] \right\}; \quad (10)$$

$$D_{g,x} = D_0 + D_g - E_{0x} / (E_{0x} - C_0). \quad (11)$$

После чего на основе уравнения (1) определим зависимость $N_x(\sigma_a)$ числа циклов от напряжения σ_a до разрушения трубопровода, поврежденность которого соответствует величине D_{gx} :

$$N_x(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{0x} C_0 \sigma_a)], \quad (12)$$

где $A_{0x} = D_{gx} / (1 - D_{gx})$.

В результате имеем две зависимости для расчета числа циклов до разрушения: первая (7), не учитывающая циклическое деформирование трубопровода с ДДПЧ, и вторая (12), отражающая снижение долговечности трубопровода вследствие накопления усталостных повреждений в период его работы с датчиком. Поскольку рассчитанные по выражениям (7) и (12) числа циклов отличаются на N_d , имеем следующее уравнение:

$$N(\sigma_a) = N_x(\sigma_a) + N_d. \quad (13)$$

Данное уравнение, учитывая зависимости (7) и (12), относительно σ_a является трансцендентным, и его решение осуществляется численным методом.

Для принятых исходных данных ($x_g = 12$ мм, $N_d = 1000$ циклов) в результате решения уравнения (13) определено $\sigma_a = 379,356$ МПа. В том случае, если реакция на ДДПЧ $x_g = 12$ мм возникла при $N_d = 2000$ циклов, $\sigma_a = 338,477$ МПа, если же при $N_d = 5000$ циклов, $\sigma_a = 244,041$ МПа. Результаты расчетов свидетельствуют, чем больше требуется число циклов деформирования для возникновения в сечении датчика $x_g = 12$ мм реакции в виде первых «темных пятен», тем меньшая величина амплитуды действует на исследуемой поверхности трубопровода.

Методика 2 определения медианного значения числа циклов до разрушения трубопровода, подвергаемого в процессе эксплуатации циклическому нагружению в течение $N_1 = 10000$ циклов при $\sigma_{a1} = 350,0$ МПа, после чего трубопровод продолжает эксплуатироваться при другой величине амплитуды напряжений $\sigma_{a2} = 330,0$ МПа. Кривая усталости для материала трубопровода представлена на рис. 2.

Данная задача имеет важное методическое значение. При использовании для ее решения кривой усталости в традиционной форме (в виде степенной или иной математической зависимости, аппроксимирующей данные испытания образцов на долговечность) оценить ресурс детали возможным не представляется. Здесь обычно реализуемый прием расчета эквивалентных напряжений при известных параметрах ступеней блока нагружения не применим, поскольку как таковой блок нагружения отсутствует.

Воспользуемся выражением для кривой усталости (1). Подставляя в него $\sigma_a = \sigma_{a1}$ и $N = N_1$, получим уравнение с одним неизвестным $D = D_1 + D_0$, где D_1 – накопленное усталостное повреждение в мате-

риале детали за период ее циклического деформирования в течение $N_1 = 10000$ циклов при напряжении $\sigma_{a1} = 350,0$ МПа. Решение этого уравнения имеет вид:

$$D_1 = E_{01} / (E_{01} + C_0) - D_0, \quad (14)$$

где

$$E_{01} = (\sigma_{a1})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_0 - N_1}{P_{01} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_{01} = 1 - 10^{(\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b) / \vartheta^*};$$

$$N_0 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{a1})];$$

$$A_0 = D_0 / (1 - D_0).$$

Входящие в уравнение (14) величины C_0 и B_0 при известных значениях параметров кривой усталости: $\bar{\sigma}_b$; Q_T^* ; σ_R^* ; σ_{RT}^* ; ϑ^* ; D_0 рассчитываются по зависимостям (2).

Установленная величина поврежденности D_1 позволяет скорректировать кривую малоциклового усталости (1) и представить ее в форме:

$$N = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{01} C_0 \sigma_a)]. \quad (15)$$

Здесь $A_{01} = (D_1 + D_0) / (1 - D_1 - D_0)$.

Искомое медианное число циклов (N_2) до разрушения трубопровода при его циклическом деформировании при напряжении σ_{a2} рассчитывается на основе выражения (15) при подстановке в него $\sigma_a = \sigma_{a2}$:

$$N_2 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{01} C_0 \sigma_{a2})]. \quad (16)$$

Значение числа циклов, определенное по зависимости (16), $N_2 = 23640$. Если же $\sigma_{a2} = 300,0$ МПа, то $N_2 = 42080$.

Методика 3 расчета медианного числа циклов до разрушения трубопровода (N), подвергаемого в процессе эксплуатации циклическому деформированию блоком нагружения, параметры ступеней которого известны: $\sigma_{a1} = 300,0$ МПа, $N_1 = 6000$; $\sigma_{a2} = 280,0$ МПа, $N_2 = 9000$; $\sigma_{a3} = 260,0$ МПа, $N_3 = 15000$. Кривая усталости для материала трубопровода представлена на рис. 2.

В течение блока нагружения трубопровод был подвергнут $N_p = N_1 + N_2 + N_3 = 30000$ числу циклов деформирования. Для определения долговечности трубопровода определим постоянное по амплитуде эквивалентное напряжение σ_E . При этом напряжении накопленное повреждение в трубопроводе за N_p число циклов деформирования должно быть таким же, что и в процессе эксплуатации трубопровода при заданном блоке изменения напряжений.

Воспользовавшись формулами (14) при $\sigma_{a1} = 300,0$ МПа, $N_1 = 6000$, рассчитаем накопленное усталостное повреждение в материале трубопрово-

да за первую ступень блока: $D_1=3,366 \cdot 10^{-10}$. По аналогии с выражениями (14) выпишем зависимость для расчета накопленного повреждения за вторую ступень блока D_2 :

$$D_2 = E_{02} / (E_{02} + C_0) - D_0 - D_1, \quad (17)$$

где

$$E_{02} = (\sigma_{a2})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_1 - N_2}{P_{02} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_{02} = 1 - 10^{(\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b) / s^*};$$

$$N_1 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_1 C_0 \sigma_{a2})];$$

$$A_1 = (D_0 + D_1) / (1 - D_0 - D_1).$$

При $\sigma_{a2}=280,0$ МПа, $N_2=9000$ по формулам (17) рассчитаем $D_2=2,359 \cdot 10^{-9}$.

Для определения D_3 зависимости строятся подобным образом и имеют вид:

$$D_3 = E_{03} / (E_{03} + C_0) - D_0 - D_1 - D_2, \quad (18)$$

где

$$E_{03} = (\sigma_{a3})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_2 - N_3}{P_{03} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$A_2 = (D_0 + D_1 + D_2) / (1 - D_0 - D_1 - D_2);$$

$$N_2 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a3} - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_2 C_0 \sigma_{a3})];$$

$$P_{03} = 1 - 10^{(\sigma_{a3} - \bar{\sigma}_b) / s^*}.$$

В результате расчета по формулам (18) при $\sigma_{a3}=260,0$ МПа, $N_3=15000$ определим $D_3=2,240 \cdot 10^{-8}$.

За все три ступени блока материал трубопровода получит повреждение $D_\Sigma = \sum_{i=0}^3 D_i$, знание которого

позволяет кривую усталости по аналогии с выражениями (12), (15) представить в виде:

$$N_b(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_\Sigma C_0 \sigma_a)], \quad (19)$$

где $A_\Sigma = D_\Sigma / (1 - D_\Sigma)$.

Число циклов до разрушения трубопровода, деформирование которого осуществляется при амплитуде напряжения σ_E , описывается выражением (7): $N(\sigma_E)$. Это число циклов по отношению к расчету по формуле (19) при $\sigma_a = \sigma_E$ должно отличаться на величину N_p . В результате имеем следующее трансцендентное относительно σ_E уравнение:

$$N_b(\sigma_E) + N_p - N(\sigma_E) = 0. \quad (20)$$

Решая уравнение (20) численным методом (в работе для этого в системе MathCad написана программа, в которой использована подпрограмма root решения трансцендентных уравнений), определим: $\sigma_E=276,427$ МПа. Расчет медианного числа

циклов до разрушения трубопровода, учитывая, что он уже отработал в течение N_p числа циклов, выполняется по зависимости (7) при подстановке в нее $\sigma_a = \sigma_E$ и вычитание из полученного значения величины N_p . В результате реализации описанной процедуры определим, что при продолжении работы трубопровода в условиях заданного блока нагружения он выйдет из строя через 76630 циклов.

Рассмотренная задача является промежуточной при определении по показаниям ДДПЧ эквивалентных по повреждающему воздействию чисел циклов ступеней блока, когда они заданы лишь относительными величинами, установленными на основе обработки случайного процесса нагружения трубопровода в эксплуатации.

Методика 4 определения медианного числа циклов до разрушения трубопровода, циклическое деформирование которого в процессе эксплуатации осуществлялось в течение T_Σ часов в соответствии с блоком нагружения, величины напряжений каждой ступени блока известны: $\sigma_{a1}=300$ МПа; $\sigma_{a2}=280$ МПа; $\sigma_{a3}=260$ МПа, а длительность ступеней задана относительными единицами: $t_1=0,2$; $t_2=0,3$; $t_3=0,5$.

Поскольку в данном случае длительность ступеней блока нагружения в числах циклов деформирования неизвестна, воспользоваться рассмотренной выше методикой 3 и зависимостью (7), описывающей кривую усталости, для прогнозирования долговечности трубопровода возможным не представляется. Для решения поставленной задачи до работы трубопровода на исследуемый его участок помещают ДДПЧ и осуществляют эксплуатацию трубопровода с ДДПЧ в течение времени T_Σ , по истечении которого фиксируют величину x_g смещения границы первых «темных пятен» на поверхности датчика.

Обозначим через N_Σ суммарное число циклов за время работы детали с ДДПЧ, зная которое длительность ступеней блока нагружения легко рассчитывается: $N_1 = N_\Sigma \cdot t_1$, $N_2 = N_\Sigma \cdot t_2$, $N_3 = N_\Sigma \cdot t_3$.

Обратимся к формулам (8)–(10). Заменяя в них N_d на N_Σ , при $x_g = \text{const}$ зависимость (11), отражающую накопленную поврежденность материала (D_{gx}), представим в виде функции от N_Σ :

$$D_{gx}(N_\Sigma) = D_0 + D_g - E_{0x}(N_\Sigma) / [E_{0x}(N_\Sigma) - C_0]. \quad (21)$$

При известных σ_{a1} , σ_{a2} , σ_{a3} , учитывая, что $N_1 = N_\Sigma \cdot t_1$, $N_2 = N_\Sigma \cdot t_2$, $N_3 = N_\Sigma \cdot t_3$, на основании зависимостей (14), (17) и (18) определим накопленную поврежденность материала за все три ступени блока нагружения в виде функции от N_Σ :

$$D_\Sigma(N_\Sigma) = D_0 + \sum_{i=1}^3 D_i(N_\Sigma). \quad (22)$$

Поскольку величина $D_{gx}(N_\Sigma)$, зафиксированная на основе обработки реакции ДДПЧ, должна совпадать с рассчитанным по формуле (22) значением $D_\Sigma(N_\Sigma)$, имеем следующее, трансцендентное относительно N_Σ , уравнение:

$$[D_{g,x}(N_{\Sigma}) - D_{\Sigma}(N_{\Sigma})] / D_0 = 0, \quad (23)$$

где функции $D_{g,x}(N_{\Sigma})$, $D_{\Sigma}(N_{\Sigma})$ описываются, соответственно, зависимостями (21), (22), а нормирующий множитель D_0 введен с целью учета малой величины слагаемых уравнения (23).

В результате решения уравнения (23) при $\sigma_{a1}=300$ МПа; $\sigma_{a2}=280$ МПа; $\sigma_{a3}=260$ МПа; $t_1=0,2$; $t_2=0,3$; $t_3=0,5$, $x_g=15$ мм для рассмотренного в методике 2 ДДПЧ установлено: $N_{\Sigma}=5013$. Полученное значение N_{Σ} позволяет рассчитать величины N_1 , N_2 , N_3 , после чего параметры ступеней блока становятся известными и для прогнозирования медианного числа циклов до разрушения детали достаточно реализовать процедуру методики 3.

Заключение

Проведен анализ зарубежных и отечественных методик определения напряжений с использованием изготавливаемых из гальванической фольги датчиков деформаций интегрального типа (ДДИТ), на поверхности которых при циклическом деформировании вместе с исследуемой деталью возникает реакция в виде «темных пятен». Показано, что наличие у ДДИТ инкубационного периода и сложность фиксации реакции на датчике в процессе испытания деталей не позволяют

осуществлять прогнозирование их долговечности по усталостной прочности на основе показаний ДДИТ. Для решения этих задач в работе предложено осуществлять предварительную наработку гальванической фольги на тарировочном образце в условиях известного, плавно изменяющегося напряженно-деформированного его состояния до появления на поверхности фольги реакции в виде «темных пятен». Изготовленные из такой фольги датчики (ДДПЧ) не имеют инкубационного периода, оценка их реакции осуществляется путем измерения перемещения границы первых «темных пятен» на поверхности датчика и может выполняться в любой момент испытания детали. На основе кинетической теории механической усталости определена функциональная зависимость изменения накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части ДДПЧ (его чувствительного элемента), являющаяся для этих датчиков калибровочной зависимостью. Разработаны на основе зафиксированной реакции на ДДПЧ методики: определения напряжений, прогнозирования медианного числа циклов до разрушения деталей, определения эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений и количества циклов деформирования деталей в условиях их работы при блочном режиме нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention.– New York: John Wiley & Sons, 1981. – 630 p.
- Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Обработка данных многоцикловых испытаний на основе кинетической теории усталости и методов непараметрической статистики. – Тюмень, ТюмГНГУ, 2015. – 135 с.
- Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
- Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
- Даль В. Поведение стали при циклических нагрузках. – М.: Металлургия, 1982. – 568 с.
- Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие / В.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 584 с.
- Бойко В.И. О выборе материала, конструкции и технологии изготовления датчика усталостного повреждения // Заводская лаборатория. – 1981. – № 1. – С. 79–82.
- Harting D.R. The S/N-Fatigue-life Gage: a Direct Means of Measuring Cumulative Fatigue Damage // Experimental Mechanics. – 1966. – V. 6. – № 2. – P. 19A–24A.
- Okubo H. Determination of the surface stress by means of electroplating // J. Appl. Phys. – 1953. – V. 24. – Iss. 9. – P. 1130–1133.
- Maruyama K. Stress Analysis of a Bolt-Nut Joint by the Finite Element Method and the Copper-Electroplating Technique // Bulletin of the JSME. – 1974. – V. 17. – P. 442–450.
- Imamura Y., Sato S. Dynamic Stress Distribution in the Helical Gear Measured by the Copper Electroplating Method // Bulletin of the JSME. – 1978. – V. 21. – № 156. – P. 1038–1046.
- Kitaoka S., Nagase Ya. Experimental Evaluation of Stress Intensity Factor Using the Phenomena of Grain Growth and Slip-initiation in Copper Foil // Bulletin of JSME. – 1984. – V. 27. – № 233. – P. 2353–2359.
- Kitaoka S., Nagase Ya., Seika M. Stress Measurement Using Slip-initiation Phenomenon in Iron Foil // Bulletin of the JSME. – 1981. – V. 24. – № 197. – P. 1901–1908.
- Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 206 с.
- Examination of the Adaptability of the Copper Electroplating Method of Stress Analysis to the Low Temperature Range / M. Seika et al. // Bulletin of the JSME. – 1974. – V. 17. – № 107. – P. 544–551.
- Seika M., Kitaoka S. A Study on the Improvement in Sensitivity of Strain Gauges Made of Copper Electrodeposited Foil // Bulletin of the JSME. – 1984. – V. 27. – № 234. – P. 2664–2669.
- Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Сызранцева К.В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 188 с.
- Ono Y., Kitaoka S. Cyclic stress measurement method using grain size and occurrence rate of grown grains in electrodeposited copper foil // Strain. – 2011. – V. 47. – Iss. 2. – P. 154–161.
- Ono Y., Morito S. Effect of ambient temperature on stress measurement method using copper foil // Strain. – 2014. – V. 50. – Iss. 4. – P. 292–300.
- Голофаст С.Л. Диагностика работоспособности передач Новикова датчиками деформаций интегрального типа / под ред. В.Н. Сызранцева. – Новосибирск: Наука, 2004. – 164 с.
- Fatigue gage utilizing surface roughening of aluminum foil / Y. Nagase, Y. Sawaki, F. Moritake, H. Yoshida // J. Eng. Mater. Tech. – 1995. – V. 117. – P. 55–61.
- Nagase Yasuo, Nakamura Yoshiyuki. Fatigue gauge utilizing slip deformation of aluminum foil // JSME Int. J., Series 1. – 1992. – V. 35. – P. 247–252.
- Nagase Y., Nakamura Y. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil // Trans. Japan Soc. of Mech. Eng. Series A. – 1991. – V. 57 – P. 1313–1319.

24. Nagase Ya., Nakamura T., Nakamura Yo. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (Slip Initiation and Surface Roughening Phenomena under Uniaxial Stressing) // JSME International Journal. S. I. – 1990. – V. 33. – № 4. – P. 506–513.
25. Змызгова Т.Р. Новый метод фильтрации изображений реакции датчиков деформаций // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 4 (44). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/16-04-12.ttb.pdf> (дата обращения 16.05.2017).
26. Змызгова Т.Р. Особенности бинаризации полутоновых изображений реакции датчиков деформаций // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2 (54). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/01-02-14.ttb.pdf> (дата обращения 6.05.2017).
27. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges // IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng. – 2016. – V. 127. – Article Number 012051.
28. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Dvoynikov M.V. Application of finite element analysis at development of Integral Strain Gauges calibration method for research of welded construction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177. – Article Number 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012133.
29. Тютрин С.Г. Усталостный датчик из индиевой фольги // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 82–83.
30. Усталостный датчик из оловянной фольги / С.Г. Тютрин, И.И. Манило, А.А. Городских, С.В. Герасимов // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 9. – С. 52–54.
31. Марголин А.М., Кузяков О.Н. Автоматизация процесса измерения усталостных повреждений и оценки остаточного ресурса конструкций // Электронные средства и системы управления. – 2007. – № 2. – С. 65–67.
32. Копнов В.А., Котельников А.П. Прогнозирование ресурса металлоконструкций транспортных машин датчиками деформаций интегрального типа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – № 3. – С. 76–82.
33. Москвин П.В. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок // Дефектоскопия. – 2007. – № 12. – С. 86–98.
34. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной поврежденности углеродных композитов / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 47–59.
35. Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images / S.V. Panin, A.V. Eremin, P.S. Lyubutin, M.V. Burkov // IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng. – 2014. – V. 66. – Article Number 012024.
36. Investigation of «smart sensor's» behavior during cyclic test of carbon fiber reinforce polymer / M.V. Burkov et al. // Proc. Int. Conf. Mech. Eng., Automation and Control Systems (MEACS). – Tomsk: IEEE, 2014. – P. 448–453.
37. Investigation of Sensitivity of Aluminum Foil Based Strain Sensors at Fatigue Damage Evaluation of CFRP / M.V. Burkov, S.V. Panin, P.S. Lyubutin, A.V. Eremin // Adv. Mater. Res. – 2014. – V. 1040. – P. 943–948.
38. An approach for structural health monitoring of CFRP using aluminum foil sensors / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin // 11th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing. – Prague, 2014. – Article Number 16703.
39. Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin, P. Maruschak, A. Menou // Procedia Technology. – 2015. – V. 19. – P. 307–312.
40. Способ изготовления датчиков для контроля циклических деформаций: пат. Рос. Федерация № 2209412; заявл. 11.03.2001, опубл. 27.07.2003. – Бюл. № 21. – 4 с.
41. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
42. Почтенный Е.К. Оценка циклической прочности деталей машин // Вестник машиностроения – 1969. – № 9. – С. 11–15.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Сызранцев В.Н., доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

Сызранцева К.В., доцент кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета.

UDC 621.01/.03

DETERMINATION OF STRESSES AND RESIDUAL LIFE IN ACCORDANCE WITH INDICATIONS OF VARIABLE-SENSITIVITY INTEGRAL STRAIN GAUGE

Vladimir N. Syzrantsev¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Ksenia V. Syzrantseva¹,

kv.syzr@gmail.com

¹ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance. The urgent problems of any stage of mechanical engineering development are the reduction of time for design and mastering the production of new items of machines, and the increase in their reliability and life-time. The period for the item follow-on can be shortened by experimental methods that allow determining the character of cyclic stresses (strains) distribution along the investigated part surfaces, estimating their serviceability and fatigue strength at the initial stages of testing. The opportunities of experimental methods are essentially expanded when the level of cyclic stresses is assessed by means of integral strain gauges made of a foil having certain characteristics. The long-term experience of applying the integral strain gauges indicate that they can be used to establish a wide range of problems on determining the character of surface stress variation for parts and load-carrying elements of machines, recovery of the stress distribution law, determination of equivalent stresses, assessment of location and terms of probable fractures of items within the stand and operation tests of machines. At the same time, implementation of the developed techniques for integral strain gauges applying during operation of the items revealed a number of problems related to both monitoring the integral strain gauges-reaction and uncertainty of the testing time because of the incubation period of the gauge prior to appearance of its reaction. The important problem of forecasting the life-time of parts, metallic structures of machines, oil and gas pipes that are subjected to a random spectrum of cyclic strain is the assessment of the accumulated fatigue damages of the metal. This problem solution demands the development of models that relate the reaction on the integral strain gauges to the level of damages occurred in operation of the gauged item.

The aim of the study is to develop the variable-sensitivity integral strain gauge that is characterized by a variable sensitivity to the amplitude of cyclic loads without the incubation period. This gauge allows simplifying considerably the registration of variable-sensitivity integral strain gauge reaction at any moment of the item testing; to develop the techniques for solving the problems of forecasting the life-time of machine parts and oil and gas pipe elements, that is the technique for stress measurement, the analysis of equivalent stresses and equivalent numbers of loading cycles in accordance with the damaging effect.

The methods used in the study: the kinetic theory of mechanical fatigue, numerical methods for solving the transcendental equations, the strength of materials.

The results. The paper considers the technique for producing variable-sensitivity integral strain gauge. The authors have determined the variation of accumulated damages (obtained within the preliminary operating time of the gauge) for the operating part of the gauge without reaction based on the kinetic theory of mechanical fatigue. The problems of stress determination and forecasting the median number of cycles prior to fracture of the item based on variable-sensitivity integral strain gauge indications were solved. For operating conditions of the item at the block mode of loading the reaction of variable-sensitivity integral strain gauge was used to determine the equivalent stress according to the damaging effect and the equivalent strain according to the damaging effect of the numbers of cycles.

Key words:

Integral strain gauges, variable sensitivity, kinetic theory of mechanical fatigue, cyclic stresses, fatigue damages, equivalent stresses, durability.

REFERENCES

- Collins J.A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*. New York, John Wiley & Sons, 1981. 630 p.
- Syzrantsev V.N. *Obrabotka dannykh mnogotsiklovyykh ispytaniy na osnove kineticheskoy teorii ustalosti i metodov neparametricheskoy statistiki* [Data processing of high-cyclic fatigue test based on the kinetic theory of fatigue and methods of nonparametric statistics]. Tyumen, TSOGU Publ., 2015. 135 p.
- Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. *Prochnost i iznosostoykost detaley mashin* [Strength and durability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 319 p.
- Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsey* [Forecasting the resource of machines and structures]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 312 p.
- Dal V. *Povedenie stali pri tsiklicheskikh nagruzkakh* [Steel behavior under cyclic loads]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 568 p.
- Kasatkin B.S., Kudrin A.B., Lobanov L.M. *Eksperymentalnye metody issledovaniy deformatsiy i napryazheniy* [Experimental methods for studying deformations and stresses]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 584 p.
- Boyko V.I. *O vybore materiala, konstruktsey i tekhnologii izgotovleniya datchika ustalostnogo povrezhdeniya* [On the choice of material, design and manufacturing techniques of the gauge of a fatigue damage]. *Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 1981, no. 1, pp. 79–82.
- Harting D.R. The S/N-Fatigue-life Gage: a Direct Means of Measuring Cumulative Fatigue Damage. *Experimental Mechanics*, 1966, vol. 6, no. 2, pp. 19A–24A.
- Okubo H. Determination of the surface stress by means of electroplating. *J. Appl. Phys.*, 1953, vol. 24, Iss. 9, pp. 1130–1133.
- Maruyama K. Stress Analysis of a Bolt-Nut Joint by the Finite Element Method and the Copper-Electroplating Technique. *Bulletin of the JSME*, 1974, vol. 17, pp. 442–450.
- Imamura Y., Sato S. Dynamic Stress Distribution in the Helical Gear Measured by the Copper Electroplating Method. *Bulletin of the JSME*, 1978, vol. 21, no. 156, pp. 1038–1046.
- Kitaoka S., Nagase Ya. Experimental Evaluation of Stress Intensity Factor Using the Phenomena of Grain Growth and Slip-initi-

- ation in Copper Foil. *Bulletin of JSME*, 1984, vol. 27, no. 233, pp. 2353–2359.
13. Kitaoka S., Nagase Ya., Seika M. Stress Measurement Using Slip-initiation Phenomenon in Iron Foil. *Bulletin of the JSME*, 1981, vol. 24, no. 197, pp. 1901–1908.
 14. Syzrantsev V.N., Golofast S.L. *Izmerenie tsiklicheskih deformatsiy i prognozirovanie dolgovechnosti detaley po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa* [Cyclic strain measurement and machine parts longevity forecasting according to integral strain gauges indications]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 206 p.
 15. Seika M. Examination of the Adaptability of the Copper Electroplating Method of Stress Analysis to the Low Temperature Range. *Bulletin of the JSME*, 1974, vol. 17, no. 107, pp. 544–551.
 16. Seika M., Kitaoka S. A Study on the Improvement in Sensitivity of Strain Gauges Made of Copper Electrodeposited Foil. *Bulletin of the JSME*, 1984, vol. 27, no. 234, pp. 2664–2669.
 17. Syzrantsev V.N., Golofast S.L., Syzrantseva K.V. *Diagnostika nagruzhennosti i resursa detaley transmissiy i nesushchikh sistem mashin po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa* [Diagnostics of loading and resource of parts of machines transmissions and carrying systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 188 p.
 18. Ono Y., Kitaoka S. Cyclic stress measurement method using grain size and occurrence rate of grown grains in electrodeposited copper foil. *Strain*, 2011, vol. 47, Iss. 2, pp. 154–161.
 19. Ono Y., Morito S. Effect of ambient temperature on stress measurement method using copper foil. *Strain*, 2014, vol. 50, Iss. 4, pp. 292–300.
 20. Golofast S.L. *Diagnostika rabotosposobnosti peredach Novikova datchikami deformatsiy integralnogo tipa* [Serviceability diagnostics of Wildhaber–Novikov gears by integral strain gauges]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 164 p.
 21. Nagase Y., Sawaki Y., Moritake F., Yoshida H. Fatigue gage utilizing surface roughening of aluminum foil. *J. Eng. Mater. Tech*, 1995, vol. 117, pp. 55–61.
 22. Nagase Yasuo, Nakamura Yoshiyuki. Fatigue gauge utilizing slip deformation of aluminum foil. *JSME Int. J., Series 1*, 1992, vol. 35, pp. 247–252.
 23. Nagase Y., Nakamura Y. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil. *Trans. Japan Soc. of Mech. Eng. Series A*, 1991, vol. 57, pp. 1313–1319.
 24. Nagase Ya., Nakamura T., Nakamura Yo. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (Slip Initiation and Surface Roughening Phenomena under Uniaxial Stressing). *JSME International Journal. S.I.*, 1990, vol. 33, no. 4, pp. 506–513.
 25. Zmysgova T.R. The new method of the filtration of image of reactions of gauge's indications. *Technologies of technospheric safety*, 2012, vol.4. In Rus. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/16-04-12.ttb.pdf> (accessed 16 May 2017).
 26. Zmysgova T.R. The binarization's features of grayscale images of reaction of strain gauges. *Technologies of technospheric safety*, 2014, vol.2. In Rus. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/01-02-14.ttb.pdf> (accessed 6 May 2017).
 27. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng*, 2016, vol. 127, Article Number 012051.
 28. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Dvoynikov M.V. Application of finite element analysis at development of Integral Strain Gauges calibration method for research of welded construction. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, Article Number 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012133.
 29. Tyutrin S.G. Indium leaf fatigue sensor. *Russian engineering search*, 2012, no. 11, pp. 82–83. In Rus.
 30. Tyutrin S.G., Manilo I.I., Gorodskikh A.A., Gerasimov S.V. Tin Foil Fatigue Sensor. *Tractors and agricultural machinery*, 2013, no. 9, pp. 52–54. In Rus.
 31. Margolin A.M., Kuzyakov O.N. *Avtomatizatsiya protsesssa izmereniya ustalostnykh povrezhdeniy i otsenki ostatochnogo resursa konstruksiy* [Automation of the process of measuring fatigue damages and estimating the remaining life of structures]. *Electronic means and control systems*, 2007, no. 2, pp. 65–67.
 32. Kopnov V.A., Kotelnikov A.P. Forecasting metal structure resource on transport machines by stress sensors of integral type. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2009, no. 3, pp. 76–82. In Rus.
 33. Moskvina P.V. Diagnosing and forecasting the residual service life of welded metal structures of bridge cranes using metal foils. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, vol. 43, no. 12, pp. 842–852. In Rus.
 34. Panin S.V., Burkov M.V., Lyubutin P.S., Altukhov Y.A., Khizhnyak S.A. Application of integral-type deformation pickups for evaluating the fatigue damage of carbon composites. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, no. 5, pp. 288–298. In Rus.
 35. Panin S.V., Eremin A.V., Lyubutin P.S., Burkov M.V. Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng*, 2014, vol. 66, Article Number 012024.
 36. Burkov M.V. Investigation of «smart sensor's» behavior during cyclic test of carbon fiber reinforce polymer. *Proc. Int. Conf. Mech. Eng., Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, IEEE, 2014. pp. 448–453.
 37. Burkov M.V., Panin S.V., Lyubutin P.S., Eremin A.V. Investigation of Sensitivity of Aluminum Foil Based Strain Sensors at Fatigue Damage Evaluation of CFRP. *Adv. Mater. Res*, 2014, vol. 1040, pp. 943–948.
 38. Burkov M., Panin S., Lyubutin P., Eremin A. An approach for structural health monitoring of CFRP using aluminum foil sensors. *11th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing*. Prague, 2014. Article Number 16703.
 39. Burkov M., Panin S., Lyubutin P., Eremin A., Maruschak P., Menou A. Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites. *Procedia Technology*, 2015, vol. 19, pp. 307–312.
 40. Syzrantsev V.N. Sposob izgotovleniya datchikov dlya kontrolya tsiklicheskih deformatsiy [Method for manufacturing sensors to monitor cyclic deformations]. Patent RF, no. 2209412, 2003.
 41. Pochtenny E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika ustalosti mashin* [Longevity forecasting and fatigue diagnostics of machines]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 246 p.
 42. Pochtenny E.K. *Otsenka tsiklicheskoj prochnosti detaley mashin* [Estimation of cyclic durability of machine parts]. *Russian Engineering Research*, 1969, no. 9, p. 11–15.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Vladimir N. Syzrantsev, Dr. Sc., professor, Honorary Scientist of the Russian Federation, head of the department, Industrial University of Tyumen.

Ksenia V. Syzrantseva, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.