УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН: ЧАСТЬ 15. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© Александр Никитович Романов

ИМАШ РАН, Москва, Россия

alrom37@mail.ru

Аннотация. Приведены основные разработанные автором методики, измерительные средства и аппаратура для проведения испытаний конструкционных материалов при высоких температурах при циклическом нагружении в вакууме.

Ключевые слова: циклическое нагружение, деформометры, метод нагрева, вакуумная камера, программное нагружение.

MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION AND DESTRUCTION AT A STAGE OF FORMATION OF CRACKS PART 15. METHODS OF CARRYING OUT RESEARCHES AT HIGH- TEMPERATURE CYCLIC LOADING

© Alexander Romanov

IMASH RAN, Moscow, Russia

alrom37@mail.ru

Abstract. The main methods, measuring instruments and equipment for testing structural materials at high temperatures under cyclic loading in vacuum are presented.

Keywords: cyclic loading, deformometers, heating method, vacuum chamber, software loading.

Проведение исследований осуществлялось как в области малоцикловой, так и многоцикловой усталости [1-15]. Основные формы используемых при проведении испытаний образцов представлены на рис.1. При испытаниях с изотермическим нагревом применялись трубчатые образцы (рис. 1,а). При комнатных температурах испытания проводили преимущественно на образцах, представленных на рис. 1,б,в, причем первые использовались в случае измерения продольных деформаций, а вторые – поперечных. Окончательная обработка (если не требуются специальные исследования роли качества поверхности и метода ее обработки и сопротивление малоцикловому разрушению) рабочей поверхности образца – чистовое шлифование.

При проведении сравнительных исследований, например, на воздухе и в вакууме или при малых и больших соотношениях частот с применением разных установок, использовались на всех установках образцы одинаковых размеров и форм.

Для обоснования и разработки методов расчета на прочность при циклическом нагружении требуется проведение сложного эксперимента в условиях, максимально приближающихся к эксплуатационным. В связи с этим и к испытательному оборудованию, и к измерительным устройствам предъявляются особые требования по метрологическим, силовым и

температурным параметрам, связанные с необходимостью измерений деформационных характеристик при сложных условиях нагружения (выдержки с нагревом под нагрузкой, двухчастотность, программирование усилий и температуры и др.), а также исследований микроструктурных особенностей образования и развития трещин с ростом поврежденности материала.

Рис. 1. Основные формы образцов для испытания при малоцикловом нагружении

С целью изучения микроструктурных особенностей, наблюдаемых при развитии деформаций и разрушения металлов и сплавов в условиях высокотемпературного нагрева, автором была спроектирована и изготовлена вакуумная камера к установкам типа УМЭ-10т для малоцикловых испытаний.

Принципиальная схема вакуумной системы и измерительных устройств представлена на рис.2. Вакуумная система установки включает камеру 1, форвакуумный насос типа ВН-2МГ, термоэлектрическую ловушку типа ТВЛ-500, диффузионный насос типа Н-5С-М1, присоединенный к камере с помощью колена, а также систему трубопроводов. Предельное разрежение в камере $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Вакуумная камера подвешивается с помощью кронштейнов на колоннах машины. Направляющие отверстия для ввода захватов 3 и 4 после запрессовки в них бронзовых втулок растачивали за один проход. Это позволило исключить несоосность захватов: разница напряжений в диаметрально противоположных стенках образца не превышает $\pm 1\%$.

Рис. 2. Принципиальная схема и конструктивные особенности вакуумной системы

Электрические контакты вводятся в камеру через специальные вакуумные уплотнения. Подвижный захват 3 вводится в камеру 1 через сильфон 5, неподвижный 4 – с помощью резинового уплотнения 6. Предусмотрено также охлаждение корпуса камеры водой, пропускаемой по трубкам, зачеканенным в местах вакуумных вводов и соединений. Вакуумные уплотнения выполнены на вакуумной резине. Конструкция камеры позволяет также проводить испытания в среде инертных газов при избыточном давлении 0,1 – 0,2 ат.

Рис. 3. Система нагрева трубчатого образца при малоцикловых испытаниях: 1 – захват; 2 – деформометр; 3 – нагреватель; 4 – экран; 5 – образец

Для высокотемпературных испытаний используются трубчатые образцы диаметром 18 – 21 мм с толщиной стенки до 2 мм (рис.1,а). Рабочая база образца составляет 50 мм. Нагрев осуществляется вольфрамовым нагревателем диаметром 3 мм, располагаемым внутри образца (рис.3). Такая система нагрева позволяет получать температуру в рабочей зоне образца до 1500⁰С и выше. Кроме того, она открывает свободный доступ к наружной поверхности образца для исследования микроструктуры, измерения температуры и деформаций, а также для измерения электрического сопротивления рабочей зоны образца в процессе его циклического нагружения. Для нагрева используется силовой трансформатор типа ОСУ-20, а также регулировочный трансформатор типа РНО-250-10. Температура измеряется тремя платино-платинородиевыми термопарами, привариваемыми к поверхности образца.

В качестве регистрирующего прибора применен автоматический регулировочный потенциометр типа КСП-4, а в качестве датчика температуры – тиристорное устройство для регулирования температура ВТ-4. Конструкция захватов позволяет осуществлять их подогрев в зоне головок образца, что в значительной мере уменьшает теплоотвод и сохраняет равномерное распределение температуры от среднего значения, измеряемого в середине рабочей зоны размером 40 мм (отклонение не превышает $\pm 1\%$ от измеряемой величины).

Для предотвращения схватывания в резьбовом соединении захват-гайка, находящемся в нагретом состоянии в процессе температурных испытаний, используется высокотемпературная сухая смазка из дисульфида молибдена.

Измерения деформаций осуществляются либо поперечным, либо продольным деформометрами. Конструктивные особенности деформометров описаны ниже.

Сигнал, получаемый с деформометра, подается на одну из координат двухкоординатного самописца 13 (рис. 2). На вторую координату последнего поступает сигнал с измерительного моста, тензодатчики которого размещены (наклеены) на захвате 3, и таким образом осуществляется запись петли гистерезиса.

Для исследования микроструктурных особенностей деформации и разрушения образца на крышке вакуумной камеры размещен металлографический микроскоп типа МВТ [33]. Наблюдение за поверхностью образца производится через кварцевое стекло в крышке камеры. Для фотографирования микроструктуры используется микрофотонасадка типа МФН-12 или МФН-1.

Одна из установок приспособлена для проведения на ней программных испытаний с выдержками на экстремальных нагрузках в цикле. Длительность выдержки от 30 с до 18 ч задается с помощью программного устройства КЭП-12. Специально разработанная электронная схема позволяет поддерживать заданную нагрузку постоянной в процессе выдержки. Поэтому на этой установке можно также вести испытания на длительную прочность. Вторая установка (типа УМЭ-10т) приспособлена для испытаний в условиях двухчастотного нагружения, когда на малоцикловую нагрузку производится наложение второй нагрузки с большей частотой (рис.4,а). Такое наложение высокочастотной нагрузки может производиться и по режиму, показанному на рис.4,б, когда имеет место выдержка на экстремуме нагрузки низкой частоты. Как и в первой установке, время выдержки задается с помощью программного устройства КЭП-12.

Рис.4. Двухчастотные режимы нагружения

Разработанное устройство позволяет на одночастотных испытательных установках для малоциклового нагружения с одним силовым возбудителем, у которых реверс направления нагружения происходит по достижении заданной величины нагрузки или деформации (например, установки типа УМЭ-10т), осуществить двухчастотный режим мягкого или жесткого нагружения.

Работа устройства основана на следующем принципе. Величина усилия (деформации) при растяжении и сжатии на испытательной установке задается с помощью контактов, размещенных, например, на шкале силоизмерительного прибора, и движущейся стрелки шкалы нагрузок. Замыкание каждой пары контактов при движении стрелки вызывает реверс двигателя нагружающей системы. Если указанные ограничительные контакты зафиксировать жесткой связью и задать им совместное перемещение с угловой скоростью $\omega_1 < \omega_2$ (где ω^2 – угловая скорость перемещения стрелки прибора, или, что то же самое, подвижного контакта, определяемая скоростью нагружения), то за счет реверса нагрузки при замыкании контакта, движущегося со скоростью ω_2 , с контактами, перемещающимися со скоростью ω_1 , получаем эффект изменения величины статической составляющей высокочастотной нагрузки. Если перемещение жестко закрепленных между собой контактов сделать реверсивным, то получаем двухчастотный режим изменения нагрузки, где частоты определяются скоростями перемещения контактов ω_1 и ω_2 (рис.4,а). При этом угол перемещения связанных контактов определяет величину максимальной и минимальной нагрузки в цикле, а заданный между

ними угол определяет величину накладываемой высокочастотной нагрузки. Таким образом получаем двухчастотный режим мягкого нагружения. Для осуществления двухчастотного режима жесткого нагружения используются контакты машины, с помощью которых задается размах упругопластической деформации. Если при достижении максимальной нагрузки (деформации) в цикле прекратить на некоторое время перемещение связанных между собой контактов и продолжать циклическое нагружение высокочастотной нагрузкой, то получаем эффект наложения высокочастотной нагрузки на постоянно действующую статическую (рис. 4,б).

На рис.5 схематически изображено устройство для получения двухчастотных режимов нагружения. Требуемый размах высокочастотной нагрузки устанавливается с помощью управляющих контактов 1 и 2 силоизмерительного устройства испытательной машины. Они закрепляются в пальцеобразном пазу ведущего сектора 3, расположенного на одной оси вращения со стрелкой 4 и приводимого в движение через коническую зубчатую передачу 5, 6 исполнительным механизмом 7, в качестве которого использован исполнительный механизм типа ПР-1 со встроенным реверсивным электродвигателем и редуктором со сменными шестернями. Регулирующее устройство механизма имеет контактную группу с подвижным контактом 8, закрепляемом на выходном валу механизма, и контактами 9, 10, устанавливаемыми в полукольцевых пазах панели 11. Положением контактов 9 и 10 задается величина максимальной и минимальной нагрузки низкочастотного цикла. При одновременно работающих возбудителе машины и исполнительном механизме стрелка 4 силоизмерительного устройства, фиксируя величину нагрузки на образце, движется с угловой скоростью ω_2 между контактами 1 и 2, которые, будучи закреплены на секторе 3, в свою очередь, приводятся в циклическое движение через зубчатую передачу 5, 6 исполнительным механизмом 7 с угловой скоростью ω_1 . Команда на реверс направления вращения исполнительного механизма подается по достижении контактом 8 одного из контактов 9 или 10.

Рис. 5. Схема устройства для получения двухчастотных режимов нагружения

Управление исполнительным механизмом осуществляется автоматически с помощью специального управляющего устройства, оснащенного командным прибором КЭП 12-V, с помощью которого осуществляется временная выдержка на экстремальных значениях низкочастотной нагрузки длительностью 0,5 – 1000 мин (характер изменения нагрузки на образцах в данном режиме работы представлен на рис.4,б).

Изложенный выше принцип осуществления двухчастотного режима нагружения, реализованный с привлечением контактных устройств, может быть также распространен и на более совершенные системы управления нагрузками и деформациями в испытательных установках с бесконтактными задающими датчиками или со следящими системами, управление которыми может осуществляться по данному принципу.

Соотношение частот на описываемой установке невелико и отличается обычно в пределах одного порядка.

Внешний вид установок представлен на рис.6 и рис.7. Электрическая схема программной установки приведена на рис.8. Она включает в себя автоматическую систему управления двигателем силового привода установки, привода форвакуумного насоса, систему нагрева образца и регулирования его температуры, а также ряд агрегатов и регистрирующих приборов вторичной аппаратуры.

Рис. 6. Общий вид программной вакуумной установки

Автоматическая система управления двигателем установки дает возможность осуществлять на ней следующие режимы нагружения испытываемого образца: мягкое и жесткое нагружения при симметричном и асимметричном циклах, нагружение с релаксацией напряжений до заданного значения нагрузки как при растяжении, так и сжатии, проведение испытаний на длительную прочность. Кроме того, можно осуществить циклическое нагружение по трапецеидальному циклу с временной выдержкой на любом из экстремумов нагрузки с поддержанием ее величины.

При задании времени выдержки на командном приборе, равном бесконечности, возможно проведение испытаний на длительную прочность с поддержанием на образце нагрузки заданной величины.

Нагрев образца осуществляется пропусканием переменного тока низкого напряжения через вольфрамовый нагреватель, размещаемый внутри трубчатого образца (рис.3). В данной установке применена система автоматического пропорционального регулирования температуры образца в процессе испытания.

Для проведения двухчастотных испытаний при высоких температурах с большим соотношением частот (частота накладываемой нагрузки до 30 Гц и более) к испытательной

установке серии МИР были разработаны и изготовлены система двухчастотного силовозбуждения с низкочастотным нагружением в области малоциклового усталости и регистрацией при этом диаграммы циклического деформирования и система нагрева образца. Внешний вид модернизированной установки с пультом управления ее системами представлен на рис.8.

Рис.7. Внешний вид вакуумной установки для двухчастотных малоцикловых испытаний

Осевое знакопеременное нагружение образца осуществляется с помощью упругих ручной привод статического нагружения, обеспечивающий проведение усталостных испытаний при асимметричных циклах нагружения, который через червячный редуктор 11 (с встроенным в него кривошипным механизмом) и рычаг 12 закручивает внешний цилиндр 13, создавая на образце статическую нагрузку. Для этого он оснащен электродвигателем постоянного тока 14 и дополнительным червячным редуктором 15, которые размещены на специальном каркасе внутри станины установки 16 на ее основании 17. Кроме того, разработана система управления электродвигателем низкочастотного привода, позволяющая осуществлять режимы мягкого и жесткого малоциклового программного нагружения образца с

наложением на них высокочастотной нагрузки. По своему принципу данная система аналогична использованной на программной установке для малоцикловых испытаний. Основным регистрирующим и управляющим прибором при этом является расположенный на пульте управления двухкоординатный потенциометр ПДС-021, на который с тензодатчиков динамометра и деформометра поступают сигналы, по которым и осуществляется процесс управления низкочастотным приводом. Высокочастотная составляющая действующей нагрузки автоматически регулируется стабилизирующим электронным устройством.

Рис.8. Схема установки для двухчастотных испытаний с большим соотношением частот

Кроме этого, с помощью разработанных полупроводниковых усилителей на интегральных микросхемах возможна регистрация на экране катодного осциллографа полных диаграмм циклического деформирования и характера изменения усилий и деформаций во времени в процессе сложных программных режимов нагружения, которые приведены на рис.9.

При отсутствии низкочастотного изменения нагрузки установка позволяет осуществлять как симметричное, так и асимметричное высокочастотное нагружение с регистрацией петли упругого гистерезиса (рис. 9,а), а при отсутствии высокочастотной нагрузки – мягкий или жесткий режимы малоциклового деформирования (рис.9,б).

В последнем случае включением в работу командного управляющего прибора КЭП-12 треугольный цикл изменения нагрузки может быть заменен на трапецеидальный (рис.9,в) с широким варьированием времени выдержки и поддержанием при этом величины действующего усилия на заданном уровне. При необходимости проведения малоцикловых испытаний с предварительной тренировкой на низких уровнях нагрузки или с предшествующим усталостному высокочастотному нагружению циклическим упругопластическим деформированием, а также при чередовании того и другого видов нагружения возможно их осуществление на данной установке путем соответствующего последовательного включения в работу ее высокочастотного и низкочастотного приводов (рис.9,г). Это полностью устраняет «машинные» погрешности в результате подобных испытаний, имеющие место при их проведении на двух различных установках, а вместе с этим и сокращает количество необходимого испытательного оборудования и облегчает условия его эксплуатации. Двухчастотные режимы мягкого и жесткого нагружения (рис.9,д) осуществляются при одновременной работе высокочастотного и низкочастотного возбудителей, причем первый из них может быть получен при подаче в систему управления сигнала обратной связи с динамометра, а второй – с деформометра установки.

Рис.9. Режимы нагружения и диаграммы циклического деформирования, получаемые на установке для двухчастотного нагружения

В случае включения в цикл изменения суммарной нагрузки на ее экстремальных значениях временных выдержек может быть осуществлен трапецидальный двухчастотный цикл (рис.9,е), имитирующий, например, режимы пуска, работы и останова агрегатов в процессе эксплуатации (низкочастотный цикл с выдержкой) и сопутствующее им наложение вибраций от работы других механизмов (высокочастотная составляющая). Максимальная нагрузка, развиваемая силовозбудителями испытательной установки, составляет от 0 до ± 50000 Н и может быть перераспределена между высокочастотной и низкочастотной составляющими в любых пропорциях по указанному диапазону, а их частоты – соответственно 30 Гц и 0,1 – 1,0 цикл/мин. При режимах нагружения с временными выдержками время низкочастотного цикла зависит от их продолжительности. Чтобы иметь возможность провести испытания по указанным режимам в области высоких температур, разработана система радиационного нагрева образца (рис.10), а также изменена конструкция захватов, выполненных из жаропрочного сплава с системой охлаждения и предусматривающих возможность компенсации температурного удлинения системы захваты – образец в процессе нагрева последнего до заданной температуры. Форма испытываемого образца принята трубчатой, что повышает его устойчивость и позволяет расположить внутри него стержневой нагреватель 2, изготовленный из дисилицида молибдена и сохраняющий свою работоспособность на воздухе при температуре на его поверхности до 1700°C . Тем самым обеспечивается диапазон рабочих температур на образце 20 – 1200°C . Активный 3 и пассивный 4 захваты для предотвращения перегрева элементов установки снабжены специальными каналами 5 и 6 для водяного охлаждения, связанными между собой гибкими дюритовыми шлангами 7 и соединенными с водной магистралью. Образец закрепляется в захватах с помощью вкладышей 8 и гаек 9, также изготовленных из жаропрочного материала. Применение сухой смазки из дисульфида молибдена в резьбовом соединении захват – гайка предотвращает схватывание в процессе работы. Закрепление нагревателя, его центрирование внутри образца, а также подвод к нему электрического тока осуществляются с помощью медных водоохлаждающих токоподводов 10, установленных в изоляторах 11 на основании станины 12 и вводимых в захваты через выполненные в них прорези. Один из

токоподводов имеет упругий элемент 13, предназначенный для компенсации температурного удлинения нагревателя. Система электрического питания последнего состоит из понижающих трансформаторов, приставки управления нагревом УПН с мощными тиристорами $ТС_1$ и $ТС_2$, а также регистрирующего потенциометра КСП-4 с платинородий-платиновой или хромель-алюмелевыми термопарами, привариваемыми точечной сваркой к поверхности образца. Принцип работы данной системы при регулировании температуры обеспечивает ее высокую стабильность и точность поддержания в пределах $\pm 0,5\%$ от заданной величины. Благодаря расположению нагревателя внутри головок образца происходит также их подогрев, обуславливая уменьшение теплоотвода в головках от рабочей базы и снижение градиента температуры по длине базы. Использование разработанной системы нагрева обеспечивает свободный доступ к наружной поверхности образца, что позволяет расположить на ней высокотемпературный деформометр для измерения продольных деформаций, а также осуществлять наблюдения с помощью металлографических микроскопов за образованием и развитием микро- и макротрещин, а в отдельных случаях – и за структурными изменениями материала в процессе программного циклического нагружения.

Рис.10. Система нагрева трубчатого образца стержневым нагревателем на модернизированной установке типа МИР-С

Для проведения испытаний разработаны методы и средства измерения деформаций при малоцикловом нагружении.

В практике малоцикловых испытаний используются обычно измерения либо продольных, либо поперечных деформаций на рабочей базе образца [15,16].

При испытании трубчатых образцов, когда необходимо иметь свободный доступ к наружной их поверхности для металлографических исследований или наблюдения за зарождением и развитием трещин, можно использовать специально разработанный тензометр, расположенный внутри образца и измеряющий поперечную деформацию его внутреннего диаметра. Конструктивно (рис.11) тензометр представляет собой два полуцилиндрических

рычага 1 и 2, соединенные между собой плоской пружиной 3. На одном из рычагов расположен упругий элемент 4 с наклеенными на него тензодатчиками 5. Контакт тензометра с внутренними стенками образца осуществляется наконечниками 6 и 7, прижим которых производится за счет предварительного поджатия винтом 8 упругого элемента 4. При накоплении пластической деформации в сторону растяжения диаметры образца уменьшаются и при этом происходит дополнительный поджим наконечников к образцу.

Так как тензометр изготовлен из алюминиевого сплава, он имеет сравнительно небольшой вес и не требует дополнительной подвески при креплении в образце. Тензометр может быть использован и для измерения продольных деформаций; в этом случае наконечники 6, 7 переставляются в отверстия 9, 10 и закрепляются теми же винтами 11 и 12. Крепление тензометра к образцу может быть осуществлено специальными пружинами с дополнительными наконечниками.

Измерение деформаций при повышенных температурах, как уже отмечалось, требует прежде всего обеспечения нормальных условий работы измерительных датчиков тензометров. Иногда это достигается удалением их из зоны нагрева и связью с образцом посредством выносных стержней и приспособлений.

Рис.11. Устройство тензометра для измерения поперечных деформаций изнутри образца

В случаях непосредственного контакта тензометра с нагретым образцом предусматриваются специальные системы его охлаждения. По этому принципу выполнены тензометры для измерения поперечных деформаций и разработанный автором тензометр для измерения продольных деформаций. Такого рода тензометр, разработанный автором (рис.12), состоит из водоохлаждаемого корпуса 2 и подвижной тяги 1, закрепленных на образце 5 с помощью расположенных на них под углом в 120° друг к другу заостренных наконечников 3 и винтов 4. Корпус 2 и тяга 1 в процессе деформирования перемещаются друг относительно друга. При этом связывающий их упругий элемент с наклеенными высокотемпературным клеем тензорезисторами 7 изменяет свой прогиб, в результате чего от соединенных по схеме моста Уитстона тензорезисторов в регистрирующую аппаратуру поступает электрический сигнал,

пропорциональной деформации образца, и производится ее запись в координатах нагрузка – деформация и деформация – время.

Взаимное перемещение корпуса и тяги сопровождается в данной конструкции весьма малыми усилиями трения в опорах, поскольку они соединены между собой через шарики 8 по подшипниковой посадке. Разнесение шариковых опор на значительное расстояние позволяет свести до минимума возможные угловые смещения оси тензометра и, следовательно, уменьшить погрешность от боковых смещений.

Рис.12. Устройство тензометра для измерения продольных деформаций образца в процессе высокотемпературных испытаний

Система охлаждения тензометра состоит из охлаждающих каналов 10 и 9, а также штуцеров 12 и 11, на которые надеваются гибкие резиновые шланги, соединяющие тензометр с водной магистралью. Система обеспечивает нормальные условия работы тензорезисторов 7 и исключает возможные заедания в шариковых опорах 8. При закреплении тензометра на образце с фиксацией винтом 4 определенной величины измерительной базы упругие элементы 13 уменьшают усилия прижима к образцу наконечников, а также компенсируют изменение диаметра образца вследствие его деформирования. Погрешность измерения деформаций данным тензометром, как и большинством рассмотренных выше, не превышает $\pm 2\%$, что находится в соответствии с требованиями, предъявляемыми к малоцикловым испытаниям.

При нормальных, а в основном при повышенных температурах испытаний используются тензометры с бесконтактным измерением деформаций. В большинстве своем они основаны на фотоэлектронном принципе действия, когда специальное электронное устройство «следит» за освещаемыми характерными участками контура образца или за специально привариваемыми к нему флажками и вырабатывает электрический сигнал при их перемещении и изменении. Данными тензометрами могут быть измерены как продольные, так и поперечные упругопластические деформации, причем в последнем случае имеет существенное значение место измерения в связи с образованием шейки при

квазистатическом разрушении. Этот вопрос решается путем сканирования тензометром профиля всего образца и регистрации изменения его диаметра по всей базе. Следует, однако, отметить, что при использовании бесконтактных фотоэлектронных тензометров погрешность измерения возрастает по сравнению с контактными тензометрами и в отдельных случаях достигает 10-15%.

Разработанный метод нагрева с размещением нагревателя внутри трубчатого образца позволил осуществлять металлографические исследования микроструктуры поверхности образца, следить за развитием трещины и деформаций в ее вершине, а также размещать специальный деформометр непосредственно на рабочей базе образца и тем самым увеличивать точность получения деформационных характеристик по сравнению с используемыми при высокотемпературных испытаниях бесконтактными методами.

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1// Вестник научно-технического развития. – 2013. - №11. - С. 38-49.
2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование// Вестник научно-технического развития. – 2014. - №1. - С. 37-54.
3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения//Вестник научно-технического развития. – 2014. - № 2. - С.36-50.
4. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 4. Основные типы микроструктурных деформационных рельефов, образующихся в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения// Вестник научно-технического развития. – 2014. - №3. - С. 31-58.
5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов//Вестник научно-технического развития. – 2014. - №9. - С.10-30.
6. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 6. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов//Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 3. - С. 32-41.
7. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении//Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 5. - С. 15-24.
8. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 8. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном нагружении конструкционных материалов// Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 6. - С. 31-39.

9. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов//Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 12. - С. 42-62.
10. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 10. Сопротивление малоциклового деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала//Вестник научно-технического развития. – 2016. - № 1. - С. 34-41.
11. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 11. Структурные параметры деформационного старения при высокотемпературном малоцикловом разрушении// Вестник научно-технического развития. – 2016. - №3. - С. 27-37.
12. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 12. Кинетика истинных напряжений и деформаций при малоцикловом нагружении//Вестник научно-технического развития. – 2016. - №2. - С.16-22.
13. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 13. Критерии разрушения при неоднородном напряженном состоянии// Вестник научно-технического развития. – 2016. - №9. - С. 29-36.
14. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 14. Связь статических и циклических свойств конструкционных материалов// Вестник научно-технического развития. – 2016. - № . - С.
15. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. - 280 с.
16. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения// Инженерный журнал «Справочник», Приложение. – 2007. - №6. - 36 с.

Дата поступления: 19 июля 2018 г.