

Динамическая спекл-диагностика деформаций, повреждений и ресурса деталей машин*

Владимиров А.П.

Институт машиноведения УрО РАН им. Э.С. Горкунова
Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Российская Федерация
vap52@bk.ru

Аннотация. С использованием нового когерентно-оптического метода, позволяющего в реальном времени определять деформации на минимальной базе порядка 1 мкм, изучено развитие локальных пластических деформаций в сплаве Д16 вплоть до зарождения усталостной трещины. Показано, что предельная локальная растягивающая деформация, соответствующая зарождению трещины, при многоциклового усталости имеет порядок 10^{-1} . На основе проведенных ранее исследований на оргстекле и стали, а также данных, полученных на сплаве Д16, сделан вывод о корректности сделанного ранее предположения о механизме накопления повреждений материалов. Этим механизмом является хаотическое тепловое движение атомов и молекул в локальных областях, постоянно находящихся под действием растягивающих деформаций. Рассмотрены сведения, необходимые для численного расчета локальных деформаций и накопления повреждений. Обсуждается концепция оценки остаточного ресурса деталей на основе датчиков и методов неразрушающего контроля нового поколения. Рассмотрены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: детали машин, сплав Д16, многоциклового усталость, спеклы, деформация, повреждение, ресурс

ВВЕДЕНИЕ

При разработке новых машин и механизмов, изготавливаемых для эксплуатации в сложных режимах работы, расчет и оценка ресурса деталей является не до конца решенной задачей. В частности, согласно разным публикациям [1-3], от 50 до 80% деталей различной техники разрушаются вследствие их многоциклового усталости. Однако, несмотря на длительную историю исследований [4-7] и большое число публикаций [8, 9], в настоящее время отсутствуют методы оценки и расчета ресурса элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости, которые удовлетворяли бы требованиям инженерной практики [3]. Во многом такая ситуация связана с отсутствием простых и надежных методов изучения необратимых процессов, протекающих в локальных областях материалов без остановки периодических деформаций. После появления публикации [10] можно констатировать, что впервые в мире создан новый когерентно-оптический метод, позволяющий в реальном времени определять деформации и повреждения материалов на минимальной базе порядка 1 мкм. Теоретическое и метрологическое обоснование метода, а также примеры использования метода для изучения деформаций газообразных, жидких и твердых тел рассмотрены в статье [11]. Основной целью

проведенной работы являлось выявление механизма накопления усталостных повреждений в алюминиевом сплаве Д16. Рассматривается процесс локализации деформаций, приводится значение предельной деформации, соответствующей зарождению трещины. На основе проведенных ранее исследований на оргстекле и стали, а также данных, полученных на сплаве Д16, обосновывается проявление единого механизма накопления повреждений при переменных и постоянных нагрузках на детали машин. Обсуждаются также возможности использования полученных сведений для оптимизации численного расчета напряженно-деформированного состояния деталей и для разработки методов оценки остаточного ресурса деталей.

ОБРАЗЦЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы с плоской рабочей частью толщиной 1,6 мм с двумя симметричными вырезами радиусом 2,5 мм были изготовлены электроискровым методом из прутка алюминиевого сплава Д16 диаметром 15 мм. Расстояние между вырезами равнялось 3 мм. Следы электроискровой обработки удаляли мелкой шкуркой. Параметр шероховатости R_a лицевой освещаемой лазером поверхности образца равнялся 1,2 мкм. Тыльную поверхность полировали, ее значение $R_a = 0,04$ мкм. Далее образцы отжигали при температуре 400 °С в течение 2 часов, вместе с печкой охлаждали до комнатной температуры, подвергали естественному старению в течение недели.

Испытание образцов на усталость проводили на машине резонансного типа Микроторон Румул при частоте около 100 Гц, коэффициент асимметрии цикла равнялся 0,1.

Два образца были испытаны до появления трещины при двойной амплитуде цикла σ_a , равной пределу текучести материала $\sigma_T = 162$ МПа. Трещины образовались после 143000 (образец (а)) и 104730 (образец (б)) циклов нагружения. Развитие пластических деформаций и повреждений изучали по динамике трех спекловых изображений образца, регистрируемых на одном кадре (рис.1). Оптическая система, состоящая из лазерного модуля с длиной волны $\lambda = 0,605$ мкм и мощностью 20 мВт, двух небольших призм, расположенных вблизи объекта, телекамеры Видеоскан 415М-USB, располагалась на столике рядом с машиной для испытания на усталость. Матрица фотоприемников телекамеры состояла из 782×582 фотоэлемента размером $8,3 \times 8,3$ мкм. Направление освещения образца было в плоскости yoz , угол между осью ou и

* Эксперименты проводились при участии И.С. Каманцева, Н.А. Друкаренко и К.В. Наумова на оборудовании центра коллективного пользования "Пластометрия" в Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии наук в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации по теме АААА18-118020790148-1. Работа была частично поддержана Программой развития Уральского федерального университета в рамках программы "Приоритет-2030".

Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

направлением освещения равнялся 66 градусам. При формировании изображений 1 и 2 направления наблюдения также лежали в плоскости uoz , углы между осью ou и указанными направлениями равнялись 87 и 109 градусам соответственно. Направление наблюдения при формировании изображения 3 было в плоскости hoz , угол между осью oh и направлением наблюдения был равен 111 градусам. Изображения 2 и 3 формировали с помощью двух небольших призм, направляющих рассеянные волны в центр объектива телекамеры.

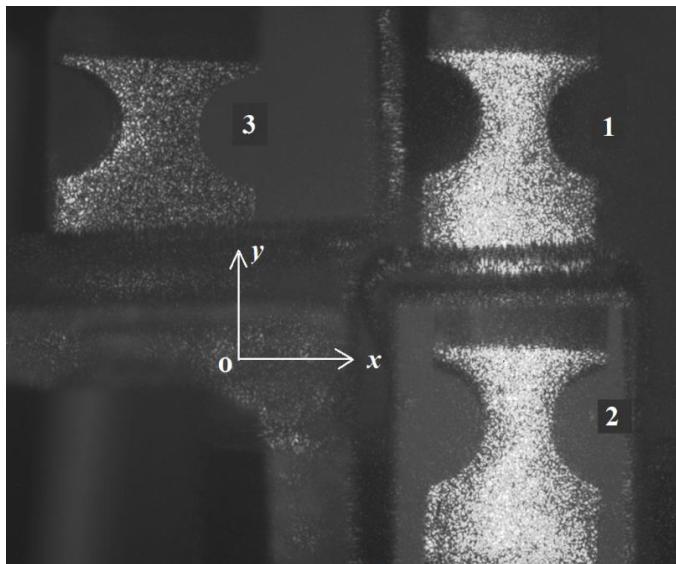


Рис.1. Три спекловых изображений образца на одном кадре

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены три совмещенные зависимости автокорреляционных функции $\eta(N)$ цифрового значения средней по времени интенсивности излучения \tilde{I} от числа N циклов нагружения, соответствующие трем ракурсам наблюдения. Величины \tilde{I} и η были зарегистрированы в зоне зарождения трещины двух разных образцов, величина η определялась по формуле (38) статьи [12] на фрагменте изображения, равном 3×3 пиксела. По методике, изложенной в статье [10], по зависимостям $\tilde{I}(N)$ и $\eta(N)$ были построены зависимости трех компонент $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ вектора относительного перемещения $\Delta \vec{u}$

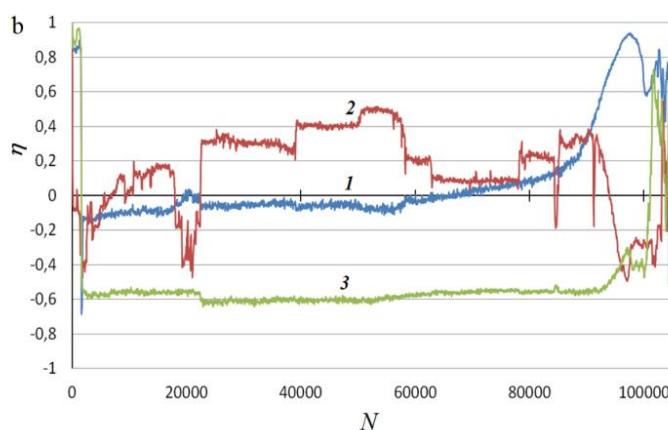
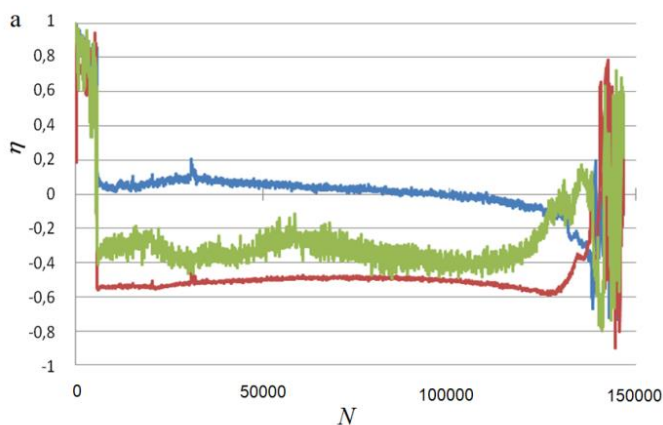


Рис. 2. Зависимости $\eta(N)$ двух образцов (а) и (б) в зоне зарождения трещины

двух точек поверхности от числа циклов нагружения N . Указанные точки располагались на некотором характерном, среднем расстоянии Δs внутри области, размер которой равен линейному разрешению Δl объектива телекамеры. Величина Δl равнялась 66 мкм. На рис. 3 приведены зависимости $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ от N для образца (б). Из приведенных на рис.3 кривых следует, что в зоне зарождения трещины предельная растягивающая деформация $\Delta u_y / \Delta s$ достигает значения порядка 10^{-1} , что по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при квазистатическом растяжении стандартных образцов. Заметим, что значения компонент вектора $\Delta \vec{u}$ для образца (а) были того же порядка. Из приведенных кривых видно, что в начале опыта по мере увеличения числа циклов растягивающая деформация быстро возрастает, затем начинается стадия ее медленного увеличения. В конце опыта деформация вновь резко увеличивается. Такое развитие деформации в литературе получило название циклической ползучести [13], характерной для циклически разупрочняющегося материала. Кривые, показанные на рис. 3 отличаются от аналогичных кривых, приведенных в литературе, предельными значениями. Поскольку ранее база измерения достигала значения до 10 см и более, то предельные значения были на 1-3 порядка меньше.

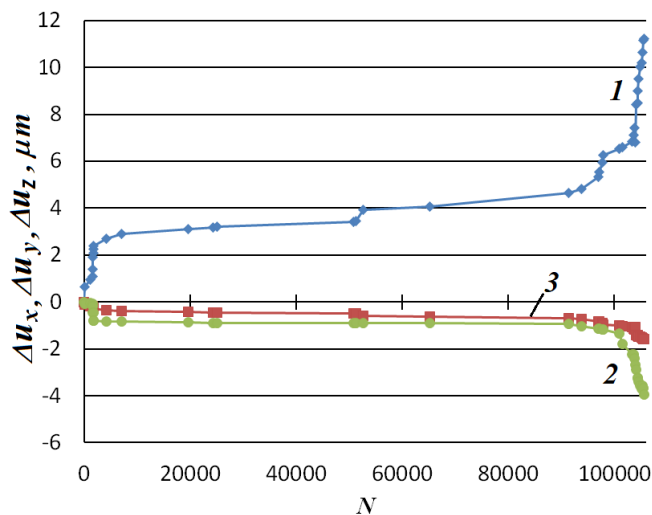


Рис. 3. Зависимости трех компонент вектора $\Delta \vec{u}$ от числа циклов N , образец (б):
1- Δu_y , 2- Δu_x , 3- Δu_z

На рис. 4 для разных циклов N приведены зависимости величины η от координаты x вдоль линии, соединяющей вершины двух вырезов. Видно, что с самого начала опыта начинается процесс локализации не обратимых деформаций. По мере увеличения N в локальных областях поверхности значения η уменьшаются, становятся отрицательными. В одной из зон локализованных деформаций значение η резко уменьшается, затем начинается квазипериодическое изменение величины η относительно нулевого уровня, как это показано на рис. 2. Именно в этой зоне зарождается трещина.

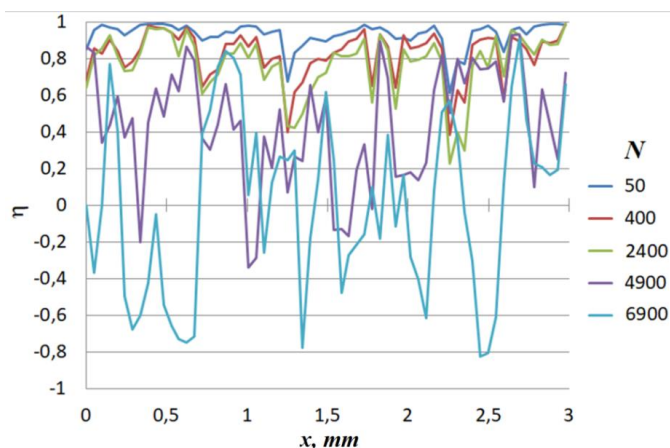


Рис. 4. Распределение величины η вдоль линии, соединяющей вершины двух вырезов

Визуальное наблюдение относительно быстро сменяющихся кадров спекловых изображений показало, что перед зарождением трещины в окрестности зоны зарождения наблюдается интенсивное «кипение» спеклов. Данный эффект наблюдался нами ранее при растяжении образцов малых размеров на жесткой испытательной машине [14]. Начало «кипения» спеклов совпадало с началом резкого падения приложенного усилия на полной диаграмме усилие – перемещение захвата и с началом падения напряжений на равновесной диаграмме напряжение – деформация. Было показано, что «кипение» спеклов связано с исчерпанием пластичности в результате достижения плотности дислокаций максимального значения. После исчерпания пластичности дальнейший рост деформации был связан не с изменением формы образца, а с изменением его объема. Показано, что в пластичных материалах образуются и растут микропоры и поры, а в хрупких материалах – микротрещины. Поскольку поры и микротрещины по сравнению с дислокациями значительно сильнее изменяют рельеф поверхности, то возникает «кипение» спеклов. На диаграммах $\tilde{\Gamma}(N)$ и $\eta(N)$ «кипение» спеклов проявляется в виде высокочастотной модуляции, налагаемой на основной тренд величин $\tilde{\Gamma}$ и η .

Данные, полученные нами как в настоящей работе на сплаве Д16, так и ранее на стали 09Г2С [10] и органическом стекле [15], а также сведения из литературы, позволяют внести определенную ясность в вопросе о механизмах накопления необратимых деформаций и повреждений при многоциклового усталости. Еще в 30-50 годы прошло-

го века Орован Е. [16] и Афанасьев Н.Н. [17] указывали, что даже если амплитуда цикла меньше предела текучести, то вследствие разброса свойств металлов, в локальных областях возникнут пластические деформации. В конце первого полуцикла в такой области при как угодно малой разгрузке возникнут несовместные деформации (при мысленном разбиении области на малые части они не впишутся в первоначальный объем). Тогда упруго деформируемая среда вне области сожмет этот материал. При полной разгрузке возникнет область сжатия, а для равновесия рядом – область растяжения. В дальнейшем при циклической деформации объекта возникнут участки, деформируемые в условиях сжатия - сжатия, растяжения - сжатия и растяжения – растяжения. Согласно кинетической концепции прочности материалов Журкова С.Н. [18], в областях, постоянно находящихся под действием растягивающих деформаций, в результате теплового хаотического движения атомов и молекул рано или поздно смещение атомов превысит предельно допустимую величину, возникнет микро - дефект. Постепенно такие дефекты возникнут во многих локально деформированных областях. Журков С.Н. методом малоуглового рассеяния рентгеновских волн оценивал размеры и концентрации дефектов, показал корректность своей концепции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, уже в начале многоциклового усталости металлов, в связи с разбросом их свойств, в локальных областях растягивающие деформации достигают значений порядка 10^{-2} . В дальнейшем по механизму циклической ползучести в этих областях происходит исчерпание пластичности. Судя по данным, опубликованным Ботвиной [19], уже на стадии ползучести вследствие хаотического движения атомов, в указанных выше областях начинается процесс накопления повреждений. После исчерпания пластичности материал переходит на стадию предразрушения - начинается процесс деформации материала путем изменения объема, а именно путем резкого увеличения числа и размеров дефектов. Одновременно в представительном объеме материала его сопротивление (предельно допустимое напряжение) снижается. Если жесткость системы, передающей усилие на указанный объем достаточно велика, то приложенное напряжение уменьшится раньше, чем упадет сопротивление. Постепенно по мере увеличения числа дефектов сопротивление материала будет уменьшаться. В конце-концов, при объединении дефектов образуется дефект, длина которого будет равна размеру представительного объема, сопротивление материала в нем станет равным нулю, равновесным образом сформируется макротрещина. Как следует из рис.3, на стадии предразрушения растягивающая деформация возрастает примерно на порядок с 10^{-2} до 10^{-1} .

Полученные ранее данные по изучению многоциклового усталости оргстекла [15] и стали [10], а также результаты данного исследования позволяют сформулировать рекомендации для разработки методов оценки и расчета долговечности деталей. Эти исследования показали, что трещина во всех указанных материалах зарождается в области размером порядка 10 мкм. Типичные датчики неразрушающего контроля имеют размеры порядка 1 -10 мм, а то и 100 мм. Поэтому гигантские эффекты, возни-

кающие в малых областях деталей, современными методами контроля не регистрируются. Необходимо создавать методы неразрушающего контроля нового поколения с датчиками матричного типа с размерами ячеек порядка 10 мкм. Судя по литературе, единичные датчики таких размеров практически для всех типов неразрушающего контроля созданы. Функционально ориентированные процессоры для обработки сигналов с датчиков матричного типа также имеются [20]. Зная предельные значения физических величин, соответствующие зарождению трещины, регистрируя скорость их изменения такими датчиками, можно оценить время до старта трещины. При расчете долговечности деталей, например, численно, получаемые новым оптическим методом данные можно применить для оптимизации метода конечных элементов. Спекловый метод позволяет получить сведения о распределении участков с пониженными свойствами в пределах детали, о распределении свойств материала в участках, об эволюции пластических деформаций и повреждений. Известно также, что в зависимости от способа разбиения детали на конечные элементы значения напряжений и деформаций изменяются в очень широких пределах. Сравнение реальных деформаций с расчетными позволит оптимизировать метод. Недостатком проведенных нами исследований является регистрация только необратимых, пластических деформаций, получаемых усреднением сигналов примерно по 50 циклам нагружения. Как было указано ранее, уже после первого полцикла напряженно-деформированное состояние в локальных областях должно кардинально изменяться. Для изучения динамики полей не только пластических, но и упругих деформаций необходимо регистрировать десятки кадров спекловых изображений за один цикл нагружения. Такие исследования нами не проводились из-за отсутствия высокоскоростных телекамер. Подобные эксперименты будут проведены в рамках дальнейших наших исследований.

Выводы

На основе данных, полученных новым спекловым методом при изучении многоциклового усталости образцов с двумя симметричными вырезами радиусом 2,5 мм, изготовленных из сплава Д16, можно сделать следующие выводы:

1. Многоцикловая усталость при коэффициенте асимметрии цикла, равном 0,1 возникает при двойной амплитуде цикла, равной пределу текучести материала (162 МПа). Уже на начальных стадиях испытания на усталость имеет место локализация пластических деформаций в малых областях поверхности. Усталостная трещина зарождается на участке размером порядка 10 мкм в одной из зон локализованных деформаций при достижении растягивающей деформации значений порядка 10^{-1} .

2. Развитие пластических деформаций в локальных областях происходит по механизму циклической ползучести циклически раз-упрочняющегося материала: вначале опыта имеет место резкое увеличение деформации, затем рост деформации происходит очень медленно, в конце опыта на стадии пред-разрушения деформация вновь резко возрастает.

3. Поскольку в зонах локализованных деформаций имеются участки, в которых в течение всего опыта дей-

ствуют растягивающие деформации, то на этих участках в соответствие с кинетической теории прочности С. Н. Журкова механизмом усталостного повреждения является смещение атомов выше предельного значения вследствие их теплового хаотического движения.

4. Не регистрация современными методами неразрушающего контроля много-циклового усталости объясняется большой базой измерения методов. Для оценки остаточного ресурса деталей необходимо создавать методы неразрушающего контроля нового поколения с датчиками матричного типа с размерами ячеек порядка 10 мкм.

5. Данные по локализации и эволюции необратимых деформаций могут быть использованы для корректного численного расчета ресурса деталей машин.

4. Направлением дальнейших исследований может быть использование спекл-фотоники для изучения эволюции упругих деформаций при многоциклового усталости различных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brinckmann S. On the role of dislocations in fatigue crack initiation (Dissertation). – Groningen, 2005. – 131 с.

2. Новиков И.И. Физическая механика реальных материалов / И.И. Новиков, В.А. Ермишин. – М.: Наука, 2004. – 328 с.

3. Lasar J. Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing / J. Lasar, M. Hola, O. Cip // Conference PhotoMechanics. Book of abstracts. (Delft: Delft University, 27-29 May 2015). – Delft, 2015. – P. 64-65.

4. Гаф Г.Дж. Усталость металлов. – М., Л.: Гл. ред. лит. по черн. металлургии, 1935. – 304 с.

5. Усталость металлов: сб. ст. под ред. Г.В. Ужика. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 378 с.

6. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2002. – 248 с.

7. Murakami Y. Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions. – Sec. Ed. Elsevier Science, 2019. – 734 p.

8. Manson S.S. Fatigue: A complex subject – some simple approximations // The William M. Murray Lecture. Exp. Mech. – 1965. - Vol. 5, no.7. – P. 193-226.

9. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of art // Int. J. Fatigue. – 2003. – Vol. 25, no. 8. – P. 679-702.

10. Vladimirov A.P. Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel / A.P. Vladimirov, N.A. Drukarenko, K.E. Myznov // Technical Physics Letters. – 2021. – Vol. 47, no. 8. – P. 773-776.

11. Владимиров А.П. Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи // HOLOEXPO 2022: XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Санкт-Петербург, 20-22 сентября 2022 г.): тезисы докладов. – Барнаул: ИП Колмогоров И.А., 2022. – С.421-429.

12. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and micro-processes in deformable media // Opt. Engineering. – 2016 – Vol. 55, no. 12. – P. 121727.

13. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 268 с.

14. Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. - Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С.168-178.

15. Владимиров А.П. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами / А.П. Владимиров, И.С. Каманцев, Н.А. Друкаренко и др. // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т.127, вып. 5. – С. 870-880.

16. Orowan E. Theory of the fatigue of metals // Proc. Roy. Soc., Ser. A. – 1939. – Vol. 171. – P. 79-106.

17. Афанасьев Н.Н. Теория возникновения трещины усталости // Статистическая теория усталостной прочности металлов. – Киев: Изд. АН Укр. ССР, 1953. – С.82-88.

18. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / Вестник академии наук СССР. – 1968. – С. 46-52.

19. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов: Учебник. – М.: Наука, 1989. – 230 с.

20. Vladimirov A.P. Real-time study of high-cycle fatigue damage using the averaged speckle dynamics / A.P. Vladimirov, N.A. Drukarenko, I.S. Kamantsev, V.N. Trishin, N.A. Lukin // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1149. – P. 012013

DOI: 10.24892/RIJIE/20230401

Dynamic Speckle Diagnostics of Deformations, Damages and Operational Life of Machine Details

Vladimirov A.P.

Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the RAS named after E.S. Gorkunov

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin

Yekaterinburg, Russian Federation

vap52@bk.ru

Abstract. Using a new coherent optical method that allows real-time determination of deformations on a minimum base of about 1 micron, the development of local plastic deformations in the D16 alloy up to the initiation of a fatigue crack has been studied. It is shown that the limiting local tensile deformation corresponding to the nucleation of the crack, with high-cycle fatigue, has the order of 0,1. Based on previous studies on plexiglass and steel, as well as data obtained on the D16 alloy, it is concluded that the previously made assumption about the mechanism of accumulation of damage to materials is correct. This mechanism

is the chaotic thermal motion of atoms and molecules in local regions that are constantly under the influence of tensile deformations. The information necessary for numerical calculation of local deformations and damage accumulation is considered. The concept of estimating the residual life of parts based on sensors and methods of non-destructive testing of a new generation is discussed. The directions of further research are considered.

Keywords: machine details, alloy D16, high-cycle fatigue, speckles, deformation, damage, operational life

Библиографическое описание статьи

Владимиров А.П. Динамическая спекл-диагностика деформаций, повреждений и ресурса деталей машин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №4. – С. 3-7. DOI: 10.24892/RIJIE/20230401

Reference to article

Vladimirov A.P. Dynamic speckle diagnostics of deformations, damages and operational life of machine details, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.4, pp. 3-7. DOI: 10.24892/RIJIE/20230401