

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15

Оценка предельных уровней рассеянных повреждений в материалах при стационарных режимах статического и циклического нагружения

**А. А. Лебедев^а, Е. Р. Голубовский^б, А. М. Локощенко^в, Н. Р. Музыка^а,
В. П. Ламашевский^а, В. П. Швец^а, Е. В. Ефименко^а**

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, Москва, Россия

^в Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Представлены результаты анализа возможных вариантов практического использования концепции рассеянных дефектов при расчетах конструкций по допускаемой поврежденности материала. Обработаны и обобщены полученные методом ЛМ-твердости на разрушенных образцах после наработки в условиях ползучести и циклической усталости экспериментальные данные по предельной поврежденности некоторых широко используемых в машиностроении сплавов. Установлена линейная корреляция уровней предельной поврежденности с рабочими напряжениями при наработке. Предложен вариант методики определения параметров корреляционного уравнения по результатам базовых опытов.

Ключевые слова: машиностроительные материалы, предельная поврежденность, твердость, ползучесть, циклическая усталость, напряжение, корреляционные уравнения, кинетические теории поврежденности.

Введение. Практически все машиностроительные материалы, в том числе стали и сплавы, содержат дефекты структуры (микротрещины, поры, химические флуктуации и др.), различные по своей природе и масштабному уровню. Эти и новые, зарождающиеся при термосиловых воздействиях, дефекты уже в начальной стадии эксплуатации конструкции начинают интенсивно развиваться, происходит рост их плотности. В зонах локализации дефектов зарождаются более опасные образования в виде макропор и макротрещин сложной конфигурации. Дальнейшее развитие таких дефектов может быть спрогнозировано с использованием хорошо разработанных алгоритмов механики разрушения [1].

В последнее десятилетие развивается теория дефектов, которые принято называть рассеянными (в англоязычной литературе – континуальными) повреждениями. Поводом к введению этого термина послужило, очевидно, наблю-

даемое во многих случаях ухудшение характеристик физико-механических свойств материала с течением времени (естественное старение), а также различные температурно-силовые воздействия, приводящие к его деградации.

Кинетические теории рассеянных повреждений. Основные концепции этого направления в механике материалов были сформулированы Л. М. Качановым и Ю. Н. Работновым, идеи которых получили развитие как в отношении усовершенствования теории описания кинетики накопления повреждений, так и при решении практических задач. Большинство работ было выполнено с позиции механики квазиоднородной среды в предположении, что распределение повреждений по объему тела равномерное. На основе этого получены уравнения, описывающие кинетику накопления повреждений, т.е. развития разрушения. В отдельных случаях результаты позволяют с большей или меньшей точностью прогнозировать текущие процессы деградации материала.

К сожалению, эффективную реализацию этого подхода сдерживает отсутствие физически и экспериментально обоснованного критерия, позволяющего адекватно судить об уровне текущей поврежденности материала и особенно о его предельных значениях, при которых наступает разрушение макрообъема.

Вторая проблема представляется более сложной и пока недостаточно разработанной, хотя в ее решении крайне заинтересованы специалисты, занимающиеся мониторингом остаточного ресурса (например, до зарождения в материале макротрещины) несущих элементов при длительной эксплуатации.

Попытка решить эту задачу была предпринята, например, учеными Института проблем машиностроения НАН Украины, разработавшими совместно со специалистами России нормативный документ, регламентирующий процедуру мониторинга ресурса элементов паровых турбин и содержащий требование обязательной оценки предельного состояния несущих элементов по уровню накопленных в процессе эксплуатации рассеянных дефектов, т.е. расчет конструкции по допускаемым повреждениям.

Новые данные о реальном ресурсе роторов, корпусных деталей и других ответственных деталей турбин позволили авторам документа скорректировать известные подходы и предложить более простую, но достаточно надежную, по их мнению, методику определения коэффициента запаса по предельному уровню поврежденности материала.

Полученные результаты были использованы в работе [3]. Ее авторы в связи с отсутствием достоверных моделей, описывающих кинетику накопления повреждений и, следовательно, их предельных значений, вынуждены ограничиться определением коэффициента запаса по суммарному предельному повреждению при ползучести (по времени до разрушения) и малоциклового усталости (по числу циклов), используя при этом линейное суммирование повреждений.

Опыт авторов работ [2, 3] является ярким примером сложности проблемы создания адекватных моделей накопления повреждений в материале при наработке и выбора экспериментально обоснованного критерия оценки текущей поврежденности и, главное, ее предельного уровня, приводящего к вязкому или хрупкому (образование макротрещины) разрушению.

Концепция оценки предельной поврежденности. Ниже по результатам обработки и обобщения экспериментальных данных, полученных при испытаниях некоторых конструкционных материалов при стационарных статическом и циклическом, в том числе высокочастотном, нагружении, предложен алгоритм определения предельного уровня рассеянных повреждений в материале в зависимости от степени его напряженности. Исходной информацией при его разработке служили результаты лабораторных опытов при фиксированных режимах испытаний, максимально имитирующих (качественно) штатные температурно-силовые условия работы материалов в реальных изделиях.

Испытания образцов, доведение их до разрушения при наработке в условиях длительного статического и циклического (с различной частотой) нагружения позволили установить устойчивые линейные корреляции предельных значений параметров поврежденности разных материалов с уровнем действующих напряжений. В качестве параметра поврежденности приняты степень рассеяния характеристик механических свойств материала, полученных на разрушенных образцах после наработки при разных уровнях напряжений. Выбор такого критерия поврежденности (деградации) материала обусловлен тем, что он хорошо зарекомендовал себя благодаря относительной простоте определения параметров поврежденности по рассеянию чисел твердости (метод LM-твердости). Реализация метода LM-твердости может быть осуществлена без нарушения целостности изделия, в том числе на работающем оборудовании с пренебрежимо малым “травмированием” без изменения качества материала. О целесообразности (в сопоставлении с другими методами аналогичного назначения) дальнейшего расширения объема и сфер внедрения метода свидетельствуют накопленный опыт его практической реализации [4–6 и др.] и отзывы специалистов [7, 8 и др.].

В качестве параметра рассеяния удобно использовать параметр m в распределении Вейбулла [9], имеющий смысл коэффициента гомогенности материала. Его можно определить по формуле Гумбеля [10]. Применительно к испытаниям на твердость эта формула имеет вид

$$m = 0,4343 d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где величину d_n определяют в зависимости от количества n измерений; H_i – значения твердости по i -му измерению; $\overline{\lg H}$ – среднее значение логарифма твердости по результатам n измерений.

Проведенные опыты свидетельствуют, что достаточно стабильные значения коэффициента m обеспечиваются при $n = 25–30$ измерений.

Оценку степени рассеяния характеристик исследуемого свойства, в том числе твердости, можно проводить по другим статистическим критериям, например по коэффициенту вариации ν , показывающему, насколько велико рассеяние величин, составляющих рассматриваемую совокупность, по сравнению со средним значением:

$$\nu = \frac{1}{\bar{H}} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где H_i и n имеют тот же смысл, что и в формуле (1); \bar{H} – среднее значение твердости.

В настоящей работе метод LM-твердости используется с целью получения данных, необходимых для проверки устойчивости указанной выше линейной корреляции, которую можно эффективно применять в расчетах предельного уровня поврежденности материала с последующим определением коэффициентов запаса при мониторинге текущего и критического состояния конструкции по рассеянным повреждениям, а также для прогнозирования кинетики изменения этих коэффициентов в процессе наработки.

Экспериментальные данные и их обсуждение. Реальную степень поврежденности материалов в зоне разрушения образцов после наработки определяли методом LM-твердости с помощью твердомера COMPUTEST SC (фирма ERNST, Швейцария), при этом сохранялись принятая технология и режимы испытаний.

С использованием базы чисел твердости материала, полученной по 30 измерениям в зоне разрушения образца, по формуле (2) определяли коэффициент вариации ν , т.е. параметр уровня поврежденности материала, который соответствует его предельному состоянию.

По этой методике исследовали образцы из сплавов ЭИ698ВД, ВТ6, которые широко используются в турбостроении, и АМг6Н, применяемого в авиационной и космической технике, а также из теплостойкой стали 10ГН2МФА. Кроме использования образцов из указанных материалов аналогичные исследования выполнены на трубной стали 17Г1С.

Предельную поврежденность сплава ЭИ698ВД [11] исследовали на образцах, разрушенных при пульсирующем циклическом нагружении до 10^4 цикл с частотой 0,1 Гц. Температура испытаний составляет 650°C . Сплошные цилиндрические образцы диаметром $d = 5$ мм и длиной рабочей части $l = 30$ мм (ГОСТ 25.502) вырезали из штампованной заготовки диска турбины в радиальном направлении и по хордам периферийной части (кольцо 1) и ступицы (кольцо 2). Испытания образцов проводили на машине УМЭ-10Т с печью радиационного нагрева при пульсирующем напряжении 78, 85 и 90 МПа. Форма цикла – близка к синусоидальной.

Уровень предельной поврежденности сплава определяли методом LM-твердости по описанной выше методике. Полученные результаты приведены на рис. 1.

Значения коэффициентов вариации материала диска и ступицы в пределах одного кольца, как это следует из результатов испытаний образцов, вырезанных по радиусу и хорде, достаточно стабильны, хотя на периферии диска они незначительно превышают таковые в зоне ступицы. Этот результат свидетельствует о высокой чувствительности метода LM-твердости, так как указанные расхождения в значениях коэффициентов вполне закономерны, поскольку металл ступичной части заготовки менее “проработан” при штамповке.

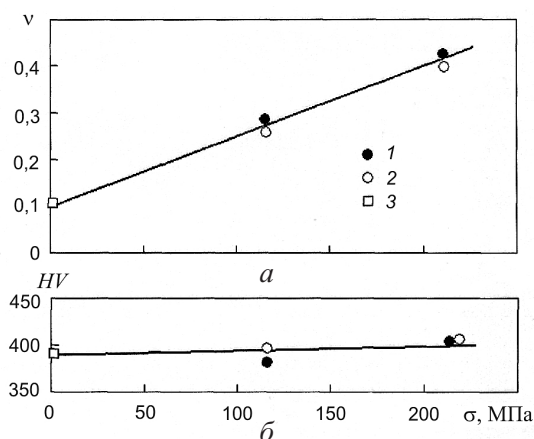


Рис. 1. Корреляция предельных повреждений материала в оценке коэффициентом вариации (a) и твердости (b) с уровнем действующих напряжений σ при наработке: 1 – зона диска; 2 – зона ступицы; 3 – исходное состояние. (Циклическое пульсирующее нагружение стали ЭИ698ВД при растяжении до 10^4 цикл с частотой 0,1 Гц.)

Поврежденность двухфазного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава ВТ6 (Ti–6Al–4V) после наработки в условиях ползучести при растяжении до разрушения исследовали на машине АИМА [12]. Использовали цилиндрические образцы, имеющие те же размеры и форму, что и при испытаниях сплава ЭИ698ВД. Испытания проводили при нагрузке 30, 117 и 217 МПа и температуре 600 и 700°C. Перед испытаниями металл образцов насыщали водородом термодиффузионным способом до уровня средней концентрации, которая составляет в трех партиях соответственно 0,1; 0,2 и 0,3%.

Степень деградации материала средней части образцов в исходном состоянии и после их разрушения определяли вышеописанным способом. Показано, что увеличение степени насыщения сплава водородом приводит к снижению уровня поврежденности. При этом линейность корреляционной зависимости $v = f(\sigma)$ сохраняется. Полученные результаты представлены на рис. 2.

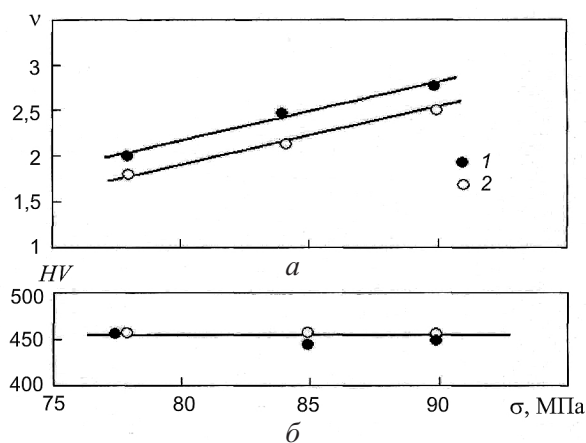


Рис. 2. Корреляция предельных повреждений материала в оценке коэффициентом вариации (a) и твердости (b) с уровнем действующих напряжений σ при наработке при статическом нагружении сплава ВТ6, насыщенного водородом до 1 (1) и 3% (2).

Процессы накопления повреждений в сплаве АМг6Н исследовали на магнитострикционной установке при гармоническом растяжении в условиях симметричного цикла нагружения с частотой 17 кГц [13]. Образцы для испытаний представляли собой резонансный полуволновой стержень с цилиндрической рабочей частью, длина которой равна половине длины волны на резонансной частоте. Распределение напряжений по длине образца соответствует гармоническому закону. Максимальные амплитуды напряжений составляют 34,3; 42,9 и 47,1 МПа, а максимальное число циклов при наработке – соответственно 6,66; 5,93 и $1,58 \cdot 10^8$ цикл.

Степень поврежденности материала в зоне разрушения в оценке коэффициентом вариации ν вариации определяли методом LM-твердости. Полученные результаты в координатах $\nu - \sigma$ и $HRB - \sigma$ представлены на рис. 3.

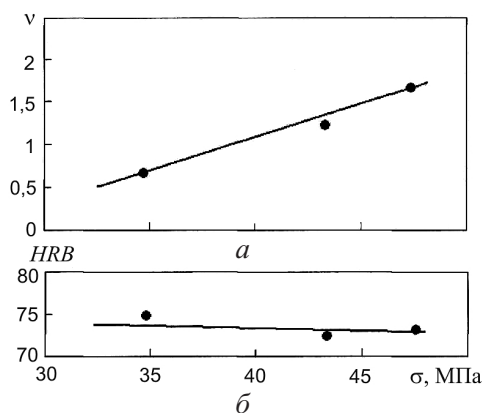


Рис. 3. Корреляция предельных повреждений материала в оценке коэффициентом вариации (а) и твердости (б) с уровнем действующих напряжений σ при наработке при циклическом нагружении сплава АМг6Н в условиях гармонического симметричного растяжения с частотой 17 кГц до 10^8 цикл.

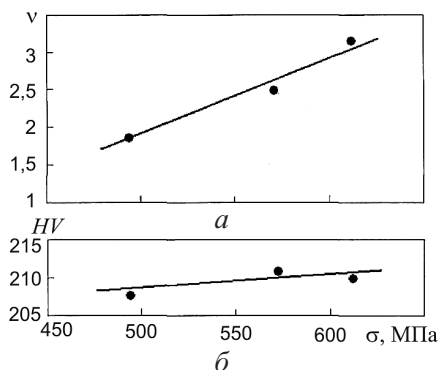


Рис. 4. Корреляция предельных повреждений материала в оценке коэффициентом вариации (а) и твердости (б) с уровнем действующих напряжений σ при наработке стали 10ГН2МФА в условиях отнулевого циклического нагружения с частотой 0,3 Гц.

Процессы деформирования и накопления повреждений в теплостойкой стали 10ГН2МФА исследовали при мягком циклическом (отнулевым) нагружении [14]. Испытания проводили на машине TF-2 (Венгрия), снабженной

устройством для реализации малоциклового нагружения образцов по трапецидальному отнулевому циклу с частотой 20 цикл/мин, с выдержкой под нагрузкой и в разгруженном состоянии в течение 1 с ($N_{\max} = 10^4$ цикл). Параметр рассеяния значений твердости определяли аналогично, коэффициент вариации рассчитывали по результатам 30 измерений. Полученные данные в координатах $\nu - \sigma$ и $HV - \sigma$ представлены на рис. 4.

Заключение. Исследование кинетики рассеянных повреждений остается слабо разработанным направлением в области механики материалов. Наиболее актуальным в этом направлении, особенно в отношении приложений, является разработка достоверных методов определения предельных уровней накопленных рассеянных повреждений (дефектов), отсутствие которых сдерживает адекватный мониторинг остаточного ресурса работающих конструкций по допускаемой поврежденности. Очень перспективной задачей является также физическое и экспериментальное обоснование используемых критериев предельной поврежденности материала (твердость, деформация, время, число циклов и др.) и достоверных, но сравнительно простых в реализации методов их определения.

Рассмотренные выше (нашедшие отражение в нормативных документах) подходы основаны на допущениях о возможности использования в качестве характеристики предельной поврежденности материала при длительной работе конструкции одновременно двух независимых параметров: времени до разрушения и числа циклов. Уровень поврежденности материала, по которому определяют коэффициент запаса, предлагается рассчитывать путем линейного суммирования этих параметров, что требует более серьезного обоснования и усовершенствования, например, метода весовых коэффициентов.

Предлагается более достоверная концепция, основанная на установленной экспериментально линейной корреляции уровня действующих при наработке напряжений со степенью предельной поврежденности материала в оценке коэффициентом вариации, который определяется по параметру рассеяния чисел твердости при массовых измерениях в зоне разрушения образца.

Две константы, входящие в линейное уравнение $\nu = f(\sigma)$, могут быть определены по результатам двух испытаний образцов до разрушения при режиме, который максимально имитирует условия работы реальной конструкции, но (для сокращения времени испытания) при форсированных по уровням и характеру изменения во времени напряжениях.

Анализ приведенных результатов свидетельствует об инвариантности установленной линейной зависимости к температурно-силовым условиям наработки (длительность и уровень напряженности металла) при статическом, мало- и многоцикловом нагружении с разной частотой циклического нагружения, включая работу материала в упругой и упругопластической областях.

Экспериментальные результаты получены в условиях одноосного растяжения. По мнению авторов, на структуру корреляционного уравнения может влиять вид напряженного состояния.

Обращает на себя внимание слабая чувствительность твердости материала разрушенных при испытаниях образцов к режиму и длительности нагружения, в том числе к степени напряженности и числу циклов. Эти

результаты, как и полученные ранее, подтверждают известные из литературных источников данные, что твердость, как и упругость, – это свойства большинства кристаллических материалов, которые мало зависят от структуры.

Отметим, что полученные экспериментальные результаты, возможно, были бы иными при использовании других методов индикации материала и критериев оценки уровня рассеянных повреждений, например, по изменению его акустических свойств, электросопротивления, внутреннего трения и др. В этом отношении результаты, полученные методом ЛМ-твердости, и критерий поврежденности в виде коэффициентов вариации чисел твердости следует считать достоверными, адекватно отражающими состояние исследуемых материалов, что свидетельствует о высокой представительности и широких возможностях метода.

Работа выполнена при содействии ГФФИ Украины (проект Ф 40.7/010) и РФФИ (проект № 11-08-90401).

Резюме

Представлено результати аналізу можливих варіантів практичного використання концепції розсіяних дефектів при розрахунках конструкцій за допустимою пошкодженістю матеріалу. Оброблено й узагальнено отримані за допомогою методу ЛМ-твердості на зруйнованих після напрацювання в умовах повзучості та циклічної втоми зразках результати щодо граничної пошкодженості деяких сплавів, які широко використовуються в машинобудуванні. Встановлено лінійну кореляцію рівнів граничної пошкодженості з робочими напруженнями при напрацюванні. Запропоновано варіант методики визначення параметрів кореляційного рівняння за результатами базових дослідів.

1. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
2. *РД 34.17.440-96.* Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продление срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М., 1996.
3. *Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І., Пожидаєв О. В.* Методологія розрахункової оцінки індивідуального ресурсу парових турбін ТЕС і ТЕЦ // Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій”. – Київ: ІЕС ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 682 – 686.
4. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // *Залізничний транспорт України.* – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.
5. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швец В. П.* Контроль качества термической обработки металла методом ЛМ-твердости // *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. докл. IX Междунар. науч.-техн. конгресса термистов и металловедов.* Т. 1. – Харьков, 2008. – С. 290 – 293.

6. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 1. – С. 9 – 16.
7. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов: пособие для научных и научно-технических работников. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 210 с.
8. Назарчук З. Т. Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд і машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 33 – 38.
9. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials: Proc. the Royal-Swedish Institute for Engineering Research. – No. 151.5. – 1939.
10. Gumbel E. J. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Application. – Washington: National Bureau of Standards, 1954. – 472 p.
11. Голубовский Е. Р., Волков А. С., Волков С. Н. и др. Характеристики конструкционной прочности (МЦУ и СРТУ) металла штамповок дисков из сплава ЭИ698ВД производства ОАО “Русполимет” // Авиац.-косм. техника и технология. – 2010. – № 9 (76). – С. 82 – 86.
12. Локощенко А. М., Ильин А. А., Мамонов А. М., Назаров В. В. Анализ ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом // Физ.-хим. механика материалов. – 2008. – № 5. – С. 98 – 104.
13. Писаренко Г. Г., Швець В. П., Майло А. М. та ін. Дослідження процесів накопичення пошкоджень в сплаві АМг6Н при багатоциклового навантаженні // Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні: Тези доповідей IV Міжнар. наук.-техн. конф. (31 травня – 2 червня 2011). – Київ. – 2011. – С. 201 – 202.
14. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р., Швець В. П. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоциклового нагружении // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 5 – 10.

Поступила 19. 09. 2011