

УДК 539.376.620.388

ВЛИЯНИЕ ТИПА ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНУ УПРОЧНЁННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Желдубовский

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Отдел механики ползучести
Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины
ул. П. Нестерова, 3, г. Киев, Украина, 03057
E-mail: creep@inmech.kiev.ua

А. Т. Сердитов

Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: Serditovot@gmail.com

Ю. В. Ключников

Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: Klyuchnikov_yu@mail.ru

П. В. Кондрашев

Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: kondrashev@ukr.net

Г. С. Моисеенко*

E-mail: 532117532117@mail.ru

*Кафедра лазерной техники и
физико-технических технологий

Механико-машиностроительный институт
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Розглядається задача виміру і якісної оцінки зміцненого поверхневого шару матеріалу, що утворюється внаслідок різних засобів обробки. Розроблена методика виміру товщини зміцненого поверхневого шару матеріалу, яка дозволяє уникнути руйнування зразка матеріалу. Обговорюються отримані результати кінетики шару матеріалу в умовах багато циклового навантаження. Сформульовано критеріальну оцінку умов руйнування зразка матеріалу від втоми

Ключові слова: вимір товщини, руйнування зразка, кінетика шару, умови руйнування, довговічність, мікротвердість

Рассматривается задача измерения и качественной оценки упрочненного поверхностного слоя материала, который образуется с использованием различных способов обработки. Разработана методика измерения толщины упрочненного слоя материала, которая позволяет избежать разрушения образца материала. Анализируются полученные результаты кинетики слоя в условиях многоциклового нагружения. Сформулирована критериальная оценка условий разрушения материала от усталости

Ключевые слова: измерение толщины, разрушение образца, кинетика слоя, условия разрушения, долговечность, микротвердость

1. Введение

подавляющее большинство деталей современных машин работает в условиях циклического воздействия нагрузок, вызывающих, как правило, разрушение в результате усталости материала. В связи с этим сопротивление усталости применяемых материалов является одним из важнейших критериев оценки конструкционной прочности многих деталей машиностроительных конструкций. В настоящей работе используется метод измерения микротвердости, который характеризуется достаточно высоким уровнем воспроизводимости полученных результатов и экспериментально обоснованной их корреляцией с механическими свойствами материала.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работах [1–3] показано, что процесс исчерпания циклической долговечности металлов даже при однородном напряжённом состоянии протекает не однородно по объёму металла, а инициируется и более интенсивно развивается в его поверхностном слое. В условиях неоднородного напряжённого состояния роль поверхности возрастает в связи с наличием градиента напряжений. К настоящему времени зависимость циклической долговечности от факторов, формирующих состояние поверхностного слоя материала, изучена достаточно подробно [4]. Актуальным представляется проведение исследований, направленных на получение количественных

оценок отмеченных закономерностей с целью разработки критериев усталостного разрушения как основы для совершенствования методов расчёта. Это, в свою очередь, требует разработки методологии исследования особенностей поведения поверхностного слоя и выбора необходимых инструментальных методик и средств. Наиболее полное и систематическое обобщение работ, выполненных в этом направлении, представлено в [5–7], где проведён всесторонний анализ изменения свойств поверхностного слоя материалов в условиях активного нагружения. Исследованные закономерности изменения микротвердости поверхности в процессе усталости, носят, как правило, качественный и познавательный характер. В то же время следует отметить, что в [8] на качественном уровне удалось разграничить разрушающие и неразрушающие уровни переменных напряжений и благодаря этому предложить методику ускоренного определения предела выносливости. На основании анализа литературных источников следует отметить следующее, в исследованиях не были учтены закономерности формирования упрочнённого поверхностного слоя при использовании различных технологических режимов обработки поверхности металлических материалов.

3. Цель и задача исследования

Целью исследования является разработка критериев усталостного разрушения, как основы для совершенствования методов расчёта на усталостную прочность. Задача настоящей работы состоит в исследовании закономерностей формирования упрочнённого поверхностного слоя (главным образом его толщины) при использовании различных технологических режимов обработки поверхности металлических материалов.

4. Методика измерения толщины поверхностного слоя

Для реализации поставленной задачи исследования был проведен анализ режимов стандартной механической обработки поверхности материалов, предназначенных для механических испытаний, а также технологических режимов лазерной и электроэрозионной обработки. Для одного из режимов исследовалась взаимосвязь кинетики изменения толщины слоя с характеристиками сопротивления многоциклового нагружению.

Методика и аппаратные решения процесса измерения текущих значений толщины поверхностного слоя металла, при циклическом нагружении, в широком диапазоне температур подробно изложена в [9]. Для определения толщины слоя h [9], обладающего отличными от сердцевины свойствами, было использовано известное соотношение для микротвердости [10]:

$$H = \frac{cP}{d}; h = 0,2d = 0,2 \left[\frac{cP}{H(P)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где c – коэффициент, зависящий от формы индентора (для пирамиды Виккерса $c=1854$); P_g – точка перелома; d – диагональ отпечатка пирамиды Виккерса (угол при вершине равен 136°).

В основу описанной методики определения толщины слоя положен эффект чувствительности масштабной зависимости микротвердости к изменению свойств поверхности материала. В данной работе использовалась модификация этого метода, заключающаяся в автоматической записи и дальнейшей расшифровке диаграммы вдавливания индентора микротвердомера в координатах «нагрузка на инденторе P – время внедрения t » [9].

В данной работе методика, основанная на автоматическом режиме нагружения индентора, использовалась применительно к материалам с поверхностным слоем, образовавшимся в результате стандартной механической обработки. Измерение толщины поверхностного слоя созданного в результате использования технологических режимов плазменной и электроэрозионной обработок осуществлялось традиционным методом измерения микротвердости по сечению образца материала.

5. Исследование толщины поверхностного слоя

Измерения толщины упрочнённого поверхностного слоя, образованного в результате различных видов обработки поверхности материалов, показали, что каждая из технологических схем обработки характеризуются определёнными особенностями. Стандартная механическая обработка металлической поверхности, предусмотренная нормативными требованиями, предъявляемыми к чистоте поверхности образцов для испытания на усталость, сопровождается образованием слоя толщиной до 10^{-5} м. По сравнению с ней методы лазерной и электроэрозионной обработки существенно отличаются технологически, реализуемыми механизмами упрочнения и получаемыми параметрами толщины слоя. В обоих названных схемах обработки поверхности основным фактором воздействия на материал и механизмы формирования толщины упрочнённого слоя является фактор локального термического воздействия, сопровождающийся структурными и фазовыми превращениями, что при прочих равных условиях зависит от природы материала и его исходных свойств. Следует также отметить, что в случае использования технологии лазерного упрочнения, качественные и количественные характеристики упрочнённого слоя поверхности варьируются в зависимости от плотности мощности излучения, скорости охлаждения материала и его теплофизических констант. В случае электроэрозионной обработки поверхности толщина слоя химико-термических и термических превращений контролируется путём использования того или иного технологического режима обработки (шлифование, резание, чистовая и черновая обработки, искровой и импульсный режимы и пр.). Таким образом, разработанную методику измерения микротвердости целесообразно использовать для реализации методов получения упрочнённого поверхностного слоя материала, с использованием лазерной и электро-

эрозионной технологий. Очевидным является наличие широкого диапазона изменения исследуемой величины, в зависимости от используемых параметров технологического режима обработки. Использование технологий лазерной обработки, применительно к исследуемым материалам, приводит к образованию упрочнённого поверхностного слоя, толщиной, практически на порядок превышающей полученную после механического полирования (достигающей $3 \div 5 \times 10^{-4}$ м), что, соответственно, требует иных методов её измерения. Диапазон изменения толщины слоя, образующегося в результате электроэрозионной обработки, в зависимости от выбранного режима может составлять $5 \times 10^{-6} \div 5 \times 10^{-3}$ м. Для материалов подвергнутых стандартной механической обработке, которая характерна большинству изделий, работающих при воздействии переменных нагрузок, с использованием разработанного подхода, выполнен цикл исследований изменения толщины упрочнённого поверхностного слоя. Исследования проводились для конструкционных сталей и жаропрочных сплавов, при многоцикловом нагружении, растяжением-сжатием, при частоте 35 Гц, в диапазоне температур 20–700 °С. На рис. 1. приведены кинетические кривые зависимости толщины упрочнённого слоя сталей 20, 40X от числа циклов нагружения и уровня действующего напряжения. Аналогичные зависимости получены для стали X18H10T и жаропрочного никелевого сплава ЭИ437А [9].

Очевидно, что воздействие циклического напряжения приводит к постепенному уменьшению толщины упрочнённого слоя по линейному закону в принятой системе координат, свидетельствующее о разупрочнении поверхности, т.е. исчерпанию барьерных функций поверхностного слоя. Степень выявленных изменений толщины поверхностного слоя для различных материалов зависит от условий нагружения-температуры и напряжения. Повышение действующего напряжения интенсифицирует процесс накопления усталостных повреждений, проявляющийся в более резком уменьшении толщины упрочнённого слоя при сохранении линейной зависимости во времени (рис. 1, а, кривые 1–3). В том же направлении проявляется влияние температуры (рис. 1, б, кривые 1, 3).

Характерно, что нагружение образцов исследуемых материалов при напряжении, равном или ниже предела выносливости, не сопровождается изменением толщины упрочнённого слоя (рис. 1, а, кривая 4), который при данных условиях нагружения сохраняет свою барьерную функцию и предотвращает разрушение материала. Обобщённые данные [9], для сталей 20, 40X, X18H10T и жаропрочного сплава ЭИ437А, свидетельствуют о том, что усталостное разрушение происходит при некоторой минимальной-критической толщине слоя h_c [9], которая практически одинакова для всех исследованных материалов, в то время как исходная толщина упрочнённого слоя h_0 [9] определяется пластичностью материала [9].

Для исследованных материалов величина h_c , находится примерно на одном уровне $(1,5 \div 3,0) \times 10^{-6}$ м и достигается за разное число циклов в зависимости от действующего напряжения. Аналогичным образом проявляется влияние температуры.

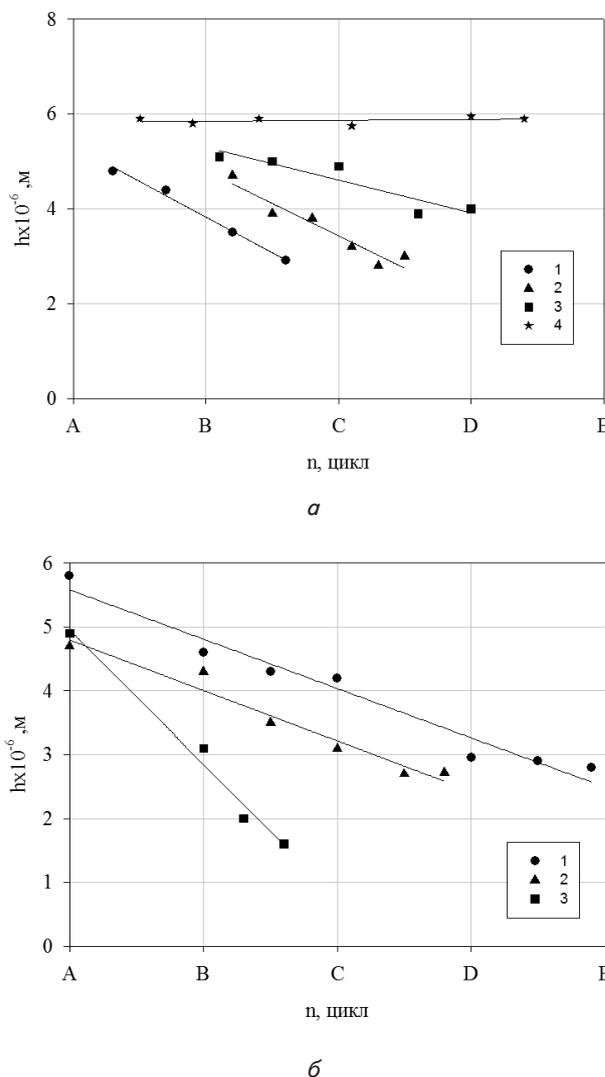


Рис. 1. Кинетические зависимости изменения толщины упрочнённого поверхностного слоя сталей h от числа циклов n нагружения (A=10³, B=10⁴, C=10⁵, D=10⁶, E=10⁷): а – сталь 20 при $\sigma_a=271$ (1), 258 (2), 246 (3) и 224 (4) МПа; б – сталь 40X при 500 °С и $\sigma_a=263$ МПа (1) и 700 °С $\sigma_a=166$ (2), 251 (3) МПа

6. Результаты исследования

Рассматривая результаты исследования свойств поверхностного слоя металлических материалов, с помощью метода микротвердости, в условиях циклического напряжения, следует отметить, что зарегистрированное качественное различие в изменении характеристики при разрушающих и неразрушающих напряжениях методологически, может быть использовано в качестве основы способа ускоренного определения предела выносливости. Анализ полученных результатов показал, что толщину поверхностного слоя и закономерности её исчерпания можно рассматривать в качестве более надёжного критерия накопления усталостных повреждений, а также использовать при прогнозировании характеристик сопротивления усталости.

При решении задач оценки остаточного ресурса и долговечности конструкционных материалов часто используются методы механики континуальной поврежденности. Наиболее эффективным подходом в решении проблемы идентификации поврежденности материала, широко применяемом на практике, является концепция эффективного напряжения, вытекающая из представления параметра поврежденности в виде соотношения [11, 12]:

$$\omega = \frac{\Delta F}{F_0} = 1 - \frac{F(t)}{F_0} \quad (2)$$

где F_0 , $F(t)$ – начальное и текущее значения площади поперечного сечения, воспринимающего нагрузку, ΔF – изменение площади. В связи с бездеформационным характером усталостного разрушения не представляется возможным измерение изменения площади сечения исследуемого объекта, подверженного циклическим нагрузкам, и использование зависимости для оценки текущей поврежденности. В то же время, как установлено, циклическая долговечность в значительной степени определяется истощением толщины упрочнённого поверхностного слоя. Следовательно, фиксируя кинетику процесса, представляется возможным оценить поврежденность материала и его долговечность.

Рассмотрим кольцевой элемент площади поперечного сечения, заключённый в тонком поверхностном слое, подверженный наиболее интенсивному повреждению при циклическом нагружении и ответственный за его разрушение. В этом случае можно записать:

$$F_0 = \pi(R - r_0)^2 \Rightarrow (R - r_0)^2 = h_0^2; \\ F(n) = \pi[R - r_0]^2 \Rightarrow [R - r_0]^2 = h^2(n), \quad (3)$$

где R – наружный радиус образца; r_0 и $r(n)$ – начальное и текущее значения радиуса образца до начала упрочнённого слоя; h_0 и $h(n)$ – начальное и текущее значение толщины упрочнённого слоя. Соотношение для параметра поврежденности при многоцикловом нагружении с учётом и запишется в виде:

$$\omega(n) = 1 - \frac{h^2(n)}{h_0^2} \quad (4)$$

Выражение даёт представление о величине накопленной поврежденности на некотором этапе нагружения в поверхностном упрочнённом слое материала, в данном случае условно принятой в форме цилиндрической оболочки. На рис. 2 представлены кинетические кривые поврежденности, построенные в координатах « ω – n » и « ω – n/n_R », для ряда исследованных материалов. Для сравнения здесь же нанесены графики $\omega = f(n/n_R)$, описывающие накопление повреждений в соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений (штриховая линия) и с использованием метода, описанного в [13] (штрихпунктирная линия), где в качестве характеристики, ответственной за повреждаемость материала, был выбран модуль нормальной упругости. Очевидно, что с

погрешностью, не превышающей 15 %, представление меры накопленной поврежденности при циклическом нагружении в виде соотношения (4) позволяет оценивать эту величину практически в пределах теоретически возможного интервала её изменения, т. е. от 0 до 1. Как следует из приведённых данных, в рамках принятого представления, наблюдается нелинейный характер накопления повреждений во времени (рис. 2, а) и независимость интенсивности процесса от уровня действующих напряжений в нормированной системе координат (рис. 2, б).

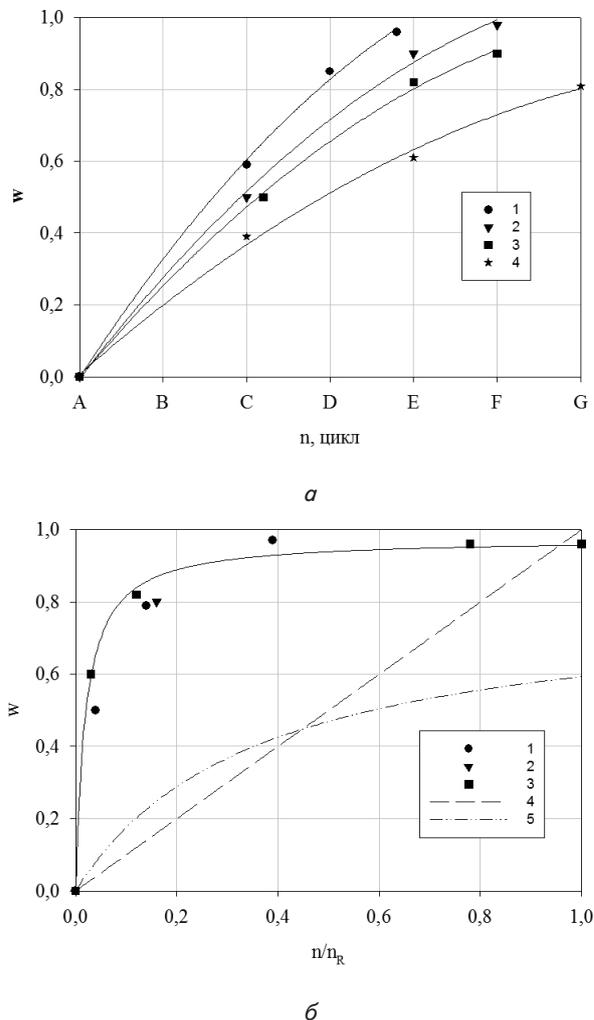


Рис. 2. Кинетические кривые поврежденности стали ω в зависимости от числа циклов нагружения n ($A=0$, $B=10$, $C=10^2$, $D=10^3$, $E=10^4$, $F=10^5$, $G=10^6$): а – для стали 40X (1) при нагружении $\sigma_a=275$ МПа, стали X18H10T (2) при 145 МПа, стали 20 (3) при 270 МПа, сплава ЭИ437А (4) при 240 МПа; б – в нормированных координатах для сплава ЭИ437А при 370 (1), 275 (2) и 240 МПа (3)

При этом наблюдается более интенсивное протекание процесса накопления повреждений на начальном этапе усталостного нагружения, что соответствует существующим представлениям [1, 5]. Приведённые для сравнения известные методы оценки параметра ω дают более далёкие от реальной картины сведения об истощении долговечности при многоцикловом нагружении.

7. Выводы

Выполненные исследования продемонстрировали эффективность разработанной методики измерения толщины упрочнённого поверхностного слоя металлических материалов, суть которой состоит в автоматическом режиме нагружения индентора, для измерения микротвердости поверхностного слоя материалов, подвергавшихся стандартной механической обработке.

Показано, что кинетические зависимости толщины слоя от длительности циклического нагружения, могут быть использованы в качестве основы для фор-

мулировки критериальных условий усталостного разрушения. На этой основе разработан и апробирован метод оценки усталостной поврежденности и кинетики её накопления применительно к конструкционным материалам энергетического машиностроения, который даёт возможность определить параметры реализованной и остаточной долговечности материала.

Выполнено сопоставление представленных результатов с данными, полученными с помощью известных методов, что показывает эффективность разработанной методики измерения толщины упрочнённого поверхностного слоя металлических материалов.

Литература

1. Tresa M. Pollock. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties [Текст] / Tresa M. Pollock, Ann Arbor, Sammy Tin // Journal of Propulsion and Power. - 2006. - №2. - С. 361-374.
2. F. W. Wang. Why does the Initial Fatigue Crack not Nucleate in the Region between Two Neighborly Located Holes in an Aluminum-Alloy Strip [Текст] / F. W. Wang, Y. H. Chen // Contemporary Engineering Sciences. - 2009. - №11. - С. 507 - 516.
3. Risitano, A. Cumulative damage by Miner's Rule and by Energetic Analisis [Текст] / Risitano, A., Corallo, D., Risitano, G. // Struct Durability Health Monitor. - 2012. - №2. - С. 91-109.
4. Risitano, A. Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters [Текст] / Risitano, A., Risitano, G. // Int J Fatigue. - 2013. - №48. - С. 214-222.
5. Желдубовский А. В. Метод оценки остаточной долговечности материала в условиях длительного статического нагружения [Текст] / А. В. Желдубовский, А. Т. Сердитов и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2013. - №63. - С. 8-12.
6. Jin-Sung, Lee. An experimental study on fatigue performance of cryogenic metallic materials for IMO type B tank [Текст] / Jin-Sung Lee, Won-Hyo You, Chang-Hyuk Yoo, Kyung-Su Kim, Yooil Kim // Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. - 2013. - (5). - С. 580-597.
7. Ergun, Ate. Usability of Polymer Concrete as a Machine-Making Material Regarding Fatigue Strength [Текст] / Ergun Ate, Mahmut Nedim Gerger // World Journal of Engineering and Technology. - 2013 (1). - С. 59-64.
8. Желдубовский А. В. Оценка запаса прочности деталей машин, подверженных асимметричному нагружению [Текст] / А. В. Желдубовский, А. Д. Погребняк и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2013. - Т. 6, №7(66). - С. 24-27.
9. Желдубовский, А. В. Об одном подходе к оценке поврежденности конструкционных материалов при многоцикловом нагружении [Текст] / А. В. Желдубовский, А. Д. Погребняк // Вибрации в технике и технологиях. - 2001. - №5. - С. 25-28.
10. Глазов, В. М. Микротвёрдость металлов [Текст] / В. М. Глазов, В. Н. Вигродович. - М.: Металлургия, 1969. - 248 с.
11. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю. Н. Работнов. - М.: Наука, 1966. - 752 с.
12. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения [Текст] / Л. М. Качанов. - М.: Наука, 1974. - 312 с.
13. Lemaitre, L. How to use damage mechanics [Text] / L. Lemaitre // Nuclear Engineering and Design. - 1984. - Vol. 80. - P. 233-245.