

УДК 539.376.620.388

А.Т. Сердитов¹, канд.техн.наук, Ю.В. Ключников¹, канд.физ.-мат.наук, А.В. Желдубовский², канд.техн.наук,
 1 – НТУ України «Київський політехнічний інститут» г.Київ, Україна;
 2 – Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАН України, г.Київ, Україна

ВЛИЯНИЕ ВИДА ОБРАБОТКИ НА ТОЛЩИНУ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛА

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

The problem of measurement and qualitative evaluation of hardened surface layer that forms as a result of various processing methods is discussed. The technique of non-destructive layer thickness measurements is proposed. The kinetics of hardened layer at multiple-cycle loads is considered. Criteria for the evaluation of fatigue conditions depending on the weariness are postulated.

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 работах [1, 2, 3] показано, что процесс исчерпания циклической долговечности металлов даже при однородном напряженном состоянии протекает не однородно по объему металла, а инициируется и более интенсивно развивается в его поверхностном слое. В условиях неоднородного напряженного 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 расчета. Это, в свою очередь, требует разработки методологии исследования особенностей поведения поверхностного слоя и выбора необходимых инструментальных методик и средств.

В настоящей работе используется метод измерения микротвердости, который характеризуется достаточно высоким уровнем воспроизводимости полученных результатов и экспериментально обоснованной их корреляцией с механическими свойствами материала.

1. Постановка задачи. Наиболее полное и систематическое обобщение работ, выполненных в этом направлении, представлено в [5], где проведен 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 [6] на качественном уровне удалось разграничить разрушающие и неразрушающие уровни переменных напряжений и благодаря этому предложить методику ускоренного определения предела выносливости. Аналогичный результат получен в [1] при исследовании изменения динамического модуля упругости в процессе усталости.

Задача настоящей работы состоит в исследовании закономерностей формирования упрочненного поверхностного слоя (главным образом его толщины) при использовании различных технологических режимов обработки поверхности металлических материалов. Анализируются режимы стандартной механической обработки поверхности материалов, предназначенных для механических испытаний, технологические режимы лазерной и электроэрозионной обработки. Для одного из режимов исследуется взаимосвязь кинетики изменения толщины слоя с характеристиками сопротивления многоциклового нагружению.

2. Методика измерения толщины поверхностного слоя. Методика и аппаратные решения процесса измерения текущих значений толщины поверхностного слоя металла при циклическом нагружении в широком диапазоне температур подробно изложена в [7]. На рис. 1.а. представлена диаграмма 1 вдавливания индентора, которая характеризуется четко выраженным переломом на участке активного нагружения. Получаемый перелом отражает изменение степени деформации деформируемого материала под индентором по мере увеличения глубины его внедрения. Последующее измерение микротвердости при нагрузке, соответствующей ординате точки перелома P_g (рис. 1.а., диаграмма 2), позволяет определить толщину слоя h , обладающего отличными от сердцевины свойствами, используя известное соотношение для микротвердости H_μ [8]

$$H_\mu = \frac{cP}{d^2} ; h = 0,2d = 0,2 \left[\frac{cP_g}{H_\mu(P_g)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где c - коэффициент, зависящий от формы индентора (для пирамиды Викакерса $c=1854$); d - диагональ отпечатка пирамиды Викакерса (угол при вершине равен 136°)

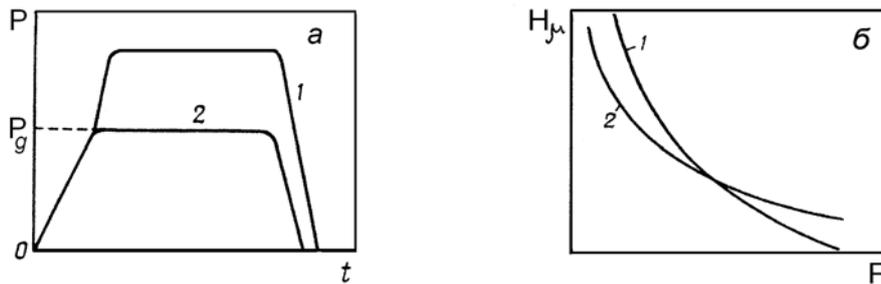


Рис. 1. Схема методики осуществления измерений микротвердости для измерения толщины упрочненного поверхностного слоя материала: а – в автоматическом режиме нагружения с записью диаграммы вдавливания в координатах «нагрузка P – время t »: 1 – диаграмма при одной из стандартных нагрузок диапазона 0,5-2,0Н; 2 – диаграмма при нагрузке, соответствующей точке перелома диаграммы 1; б – в стандартном ручном режиме во всем диапазоне нагрузок на инденторе: 1 – материал после упрочняющей обработки; 2 – исходное состояние.

В основу описанной методики определения толщины слоя положен эффект чувствительности масштабной зависимости микротвердости к изменению свойств поверхности материала. Схематично это представлено на рис. 1.б., где видно, что искусственное упрочнение поверхности на определенную глубину h (кривая 1) вызывает рост H_μ при малых нагрузках, а при внедрении индентора на глубину $h_1 > h$, т.е. при больших нагрузках приводит к снижению микротвердости ниже уровня H_μ для исходного материала (кривая 2). 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 » (рис. 1.а.).

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.

3. Исследование толщины поверхностного слоя. Измерения толщины упрочненного поверхностного слоя, образованного в результате различных видов обработки поверхности материалов показали, что каждая из технологических схем обработки характеризуются определенными 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 упрочненного 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 упрочненного 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 путем использования того или иного технологического режима обработки (шлифование, резание, чистовая и черновая обработки, искровой и импульсный режимы и пр.). Таким образом, применительно к методам получения упрочненного поверхностного слоя материала с использованием лазерной и электроэрозионной технологий очевидным является наличие широкого диапазона изменения исследуемой величины в зависимости от используемых параметров технологического режима обработки. Использование технологии лазерной обработки применительно к исследуемым материалам приводит к образованию упрочненного поверхностного слоя толщиной, практически на порядок превышающей полученную после механического полирования, достигающий $(3 \div 5) \cdot 10^{-4}$ м, и соответственно требует иных методов её измерения. Диапазон изменения толщины слоя, образующегося в результате электроэрозионной обработки в зависимости от выбранного режима может составлять $5 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-3}$ 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 упрочненного поверхностного слоя конструкционных сталей и жаропрочных сплавов при многоцикловом нагружении растяжением-сжатием с частотой 35 Гц в диапазоне температур 20-700°C. На рис. 2. приведены кинетические кривые зависимости толщины упрочненного слоя сталей 20, 40Х от числа циклов нагружения и уровня действующего напряжения. Аналогичные зависимости получены для стали X18N10T и жаропрочного никелевого сплава ЭИ437А [7].

Очевидно, что воздействие циклического напряжения приводит к постепенному уменьшению толщины упрочненного слоя по линейному закону в принятой системе координат, свидетельствующее о разупрочнении поверхности, т.е. исчерпани 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 упрочненного слоя при сохранении линейной зависимости во времени (рис. 2.а., кривые 1-3). В том же направлении проявляется влияние температуры (рис. 2.б., кривые 1,3).

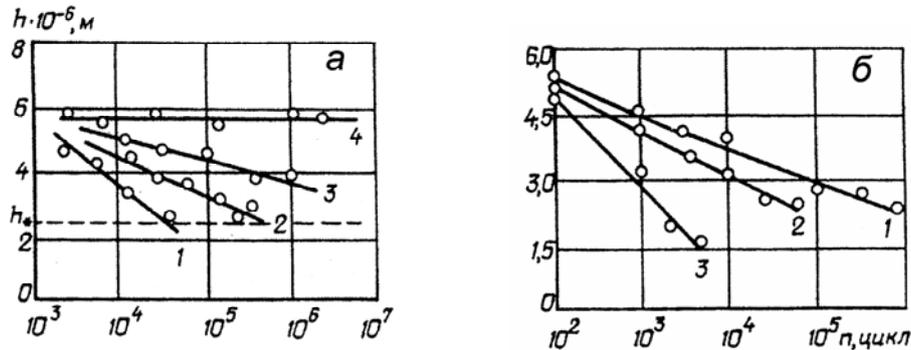


Рис. 2. Кинетические зависимости изменения толщины упрочненного поверхностного слоя сталей от числа циклов нагружения: а – сталь 20 при $\sigma_a=271$ (1), 258 (2), 246 (3) и 224 (4) МПа; б – сталь 40X при 500°C и $\sigma_a=263$ МПа (1) и 700°C $\sigma_a=166$ (2), 251 (3) МПа

Характерно, что нагружение образцов исследуемых материалов при напряжении равном или ниже предела выносливости, не сопровождается изменением толщины упрочненного слоя (рис. 2а, кривая 4), который при данных условиях нагружения сохраняет свою барьерную функцию и предотвращает разрушение материала.

Обобщенные данные, представленные на рис. 3 для сталей 20 (●), 40X (○), X18H10T (●) и жаропрочного сплава ЭИ437А (●), свидетельствуют о том, что усталостное разрушение происходит при некоторой минимальной – критической

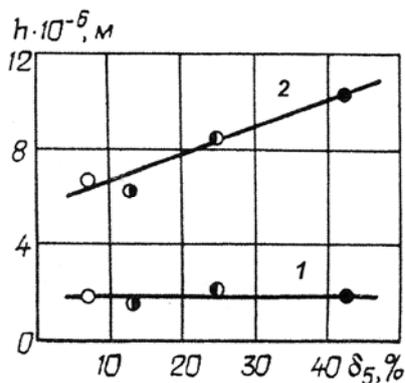


Рис. 3. Зависимости толщины поверхностного слоя материалов от их пластичности: 1 – на момент разрушения; 2 – исходное состояние

толщине слоя h_* (1) которая практически одинакова для всех исследованных материалов, в то время как исходная толщина упрочненного слоя h_0 (2) определяется пластичностью материала [7].

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

4. Обсуждение результатов. 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 H_u 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 надежного критерия накопления усталостных повреждений и 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 [10, 11]

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

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 (2) для оценки текущей поврежденности. В то же время, как установлено, циклическая долговечность в значительной степени определяется исчерпанием толщины упрочненного поверхностного слоя. Следовательно, фиксируя кинетику процесса, представляется возможным оценить поврежденность материала и его долговечность.

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

$$\begin{aligned} F_0 &= \pi(R - r_0)^2 \Rightarrow (R - r_0)^2 = h_0^2; \\ F(n) &= \pi[R - r(n)]^2 \Rightarrow [R - r(n)]^2 = h^2(n), \end{aligned} \quad (3)$$

где R – наружный радиус образца; r_0 и $r(n)$ – начальное и текущее значения радиуса образца до начала упрочненного слоя; h_0 и $h(n)$ – начальное и текущее значение толщины упрочненного слоя.

Соотношение для параметра поврежденности при многоцикловом нагружении с учетом (2) и (3) запишется в виде

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

Выражение (4) дает представление о величине накопленной поврежденности на некотором этапе нагружения в поверхностном упрочненном слое материала, в данном случае условно принятой в форме цилиндрической оболочки.

На рис. 4. представлены кинетические кривые поврежденности, построенные в координатах « $\omega - n$ » и « $\omega - n/n_R$ », 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 [12] (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.

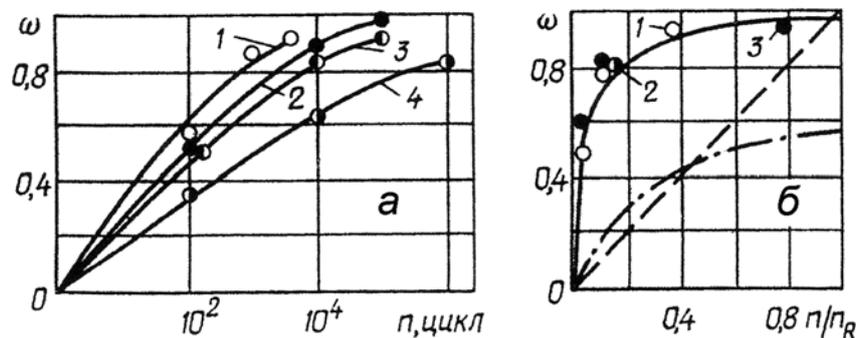


Рис. 4. Кинетические кривые поврежденности стали в зависимости от числа циклов нагружения (а) для стали 40Х (1) при $\sigma_s=275$ МПа, стали Х18Н10Т (2) при 145 МПа, стали 20 (3) при 270 МПа, сплава ЭИ437А (4) при 240 МПа и в нормированных координатах (б) для сплава ЭИ437А при 370 (1), 275 (2) и 240 МПа (3)

Как следует из приведенных данных, в рамках принятого представления наблюдается нелинейный характер накопления повреждений во времени (см. рис. 4.а.) и независимость интенсивности процесса от уровня действующих напряжений в нормированной системе координат (см. рис. 4.б.). при этом наблюдается более интенсивное протекание процесса накопления повреждений на начальном этапе усталостного нагружения, что соответствует существующим представлениям [1, 5]. Приведенные для сравнения известные методы оценки параметра ω дают более далекие от реальной картины сведения об исчерпании долговечности при многоцикловом нагружении.

Заключение. Выполненные исследования продемонстрировали эффективность разработанной методики измерения толщины упрочненного поверхностного слоя металлических материалов. Показано, что кинетические зависимости толщины слоя от длительности циклического нагружения могут быть использованы в качестве основы для формулировки критериев условий усталостного разрушения. На этой основе разработан и опробирован метод оценки усталостной поврежденности и кинетики ее накопления применительно к конструкционным материалам энергетического машиностроения, который дает возможность определить параметры реализованной и остаточной долговечности материала. Выполнено сопоставление представленных результатов с данными, полученными с помощью известных методов.

Список литературы

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 456 с.
2. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. - М.: Машиностроение, 1974. - 256 с.
3. Эвери Д., Бэкофен В. Зарождение и рост усталостных трещин // Разрушение твердых тел. - М: Металлургия, 1967-с146-190
4. Трошенко В.Т. Метод ускоренного определения предела усталости // Прикл. Механика. - 1967. - 3, № 5. - с. 50-54.
5. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. - М.: Наука, 1983. - 280 с.
6. Погребняк А.Д., Желдубовский А.В. Об оценке характеристик выносливости жаропрочных материалов. Сообщение 2. Определение предела выносливости жаропрочных сплавов в широком диапазоне температур // Пробл. Прочности. - 1984. - №6- с71-74
7. Желдубовский А.В., Погребняк А.Д. Об одном подходе к оценке поврежденности конструкционных материалов при многоцикловом нагружении // Вибрации в технике и технологиях. - 2001. - № 5. - с. 25-28.
8. Глазов В.М., Вигродович В.Н. Микротвердость металлов. - М.: Металлургия. - 1969. - 248 с.
9. Школьник А.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. - М.: Металлургия. - 1978. - 304 с.
10. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966. - 752 с.
11. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. - 312 с.
12. Lemaitre L. How to use damage mechanics // Nuclear Engineering and Design. - 1984. - 80. - p. 233-245.