

Н.А. ГАЛЕЧЯН

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ВАЛОВ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ

Для установления количественных связей между физико-механическими параметрами и технологическими факторами тонкого поверхностного слоя усталостных изломов валов при среднем уровне перенапряжений и исследования в этих слоях процесса трещинообразования произведены массовые измерения микротвердости. Результаты эксперимента обработаны методами корреляционного и регрессионного анализа. Выявлены функциональные зависимости микротвердости от глубины, а также установлено изменение значений микротвердостей по диаметальному сечению при разных уровнях перенапряжения.

Ключевые слова: усталостное разрушение, трещина, поверхность излома, микротвердость.

В [1-3] показано, что при анализе усталостных повреждений деталей из конструкционных сталей основной задачей является определение уровня нагружения разрушенной детали. При оценке напряженно-деформированного состояния, возникающего в опасных сечениях деталей и зонах изломов, большое распространение получил метод измерения микротвердости (HV). Указанный метод отличается высокой локальностью, пригоден для изучения пластических микродеформаций, предшествующих усталостному разрушению отдельно в зонах вязкого и хрупкого изломов валов, позволяет получить достоверную информацию о поведении материалов при периодическом нагружении. Он хорошо отражает все стадии процесса усталостного разрушения и вместе с тем является тонким и надежным методом физико-механического анализа, устанавливающим связь микротвердости с другими механическими характеристиками материалов.

Изучено рассеяние микротвердости в зонах вязкого и хрупкого изломов при низких и высоких уровнях перенапряжения. Доказано, что длительность периодического нагружения и уровень перенапряжений влияют на величину HV. В [1,2] выявлены оптимальные формы связи $HV=f_1(h)$ и $HV=f_2(d_x)$ (d_x - диаметральный размер в тонком поверхностном слое излома; h - глубина диаметального сечения от поверхностного слоя излома) при $\sigma_1 = 350$ МПа и $\sigma_3 = 290$ МПа.

С целью продолжения исследования [1], а также диагностирования причин усталостного разрушения тяжелонагруженных и ответственных деталей машин изучены распределения микротвердостей на микрошлифах 10 разрушенных образцов из стали 45, $d = 12$ мм, при среднем перенапряжении $\sigma_2 = 320$ МПа. На приборе ПМТ-3 (нагрузка на микроинденторе 1 Н) в зоне вязкого излома выполнено 13...14 рядов, а в зоне хрупкого излома - 8...10 рядов измерений микротвердостей с шагом 0,1...0,3 мм (рис.1).

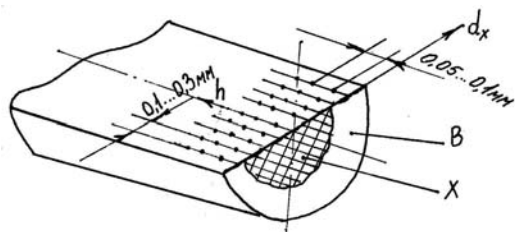


Рис.1. Схема измерения микротвердостей HV

Как правило, процесс усталостного разрушения развивается в тонком поверхностном слое деталей, преимущественно в зонах расположения концентраторов напряжений, т.е. возникает необходимость выполнения комплексных фрактографических исследований и микроструктурных измерений, т. к. в строении усталостного излома отражены все стадии процесса раз-

рушения, фронта продвижения трещины, а также степень микропластических деформаций подповерхностных слоев излома.

Режим нагружения и величина σ_i определяют характер разрушения, особенности фронта продвижения кольцевой трещины, а также размеры, формы и расположение зон вязкого и хрупкого разрушений. Со снижением уровня σ_i зона долома сужается, ее форма от концентричного круга переходит к эллипсу и имеет одноосную симметрию относительно осей поперечного сечения вала (рис. 2). Процесс усталостного разрушения и продвижения фронта кольцевой трещины также сопровождается изменением физико-механического состояния поверхностных слоев, непосредственно прилегающих к поверхности излома, но в гораздо меньшей степени, чем при поверхностно-пластическом деформировании.

На рис. 3 и 4 показаны изменения значений HV по диаметральному сечению и глубине шлифа образца. В зоне хрупкого излома, особенно в средней части, вариация свойств в структуре незначительна, и эти данные почти совпадают с исходными (здесь $HV = 300...500 \text{ МПа}$). Так как основная информация о разрушении, протекании упруго-пластических деформаций и уровне перенапряжений накоплена в тонком граничном слое излома, целесообразно производить количественную оценку изменения HV, учитывающую процессы протекания упрочнения и разупрочнения в микрообъемах металла, отдельно в зонах вязкого и хрупкого разрушений. Разности значений HV объясняются особенностью протекания процессов разрушения на разных уровнях перенапряжения.

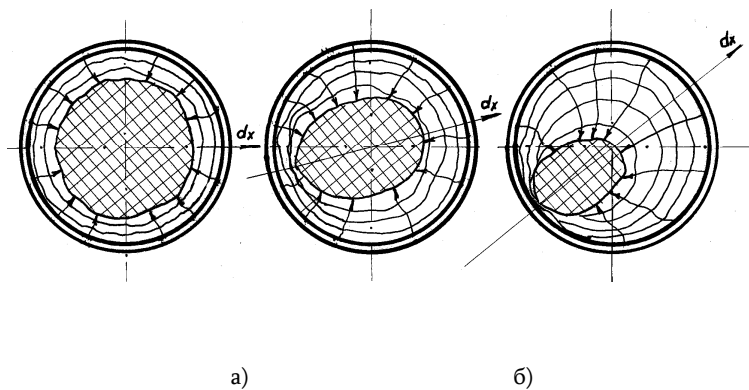


Рис. 2. Особенности фронта продвижения кольцевой трещины при:
а - $\sigma_1=350 \text{ МПа}$, б - $\sigma_2= 320 \text{ МПа}$, в - $\sigma_3=290 \text{ МПа}$

При массовых измерениях совокупности значений HV фактически характеризуют интегральную оценку микротвердости изучаемой микроструктуры. Если учесть, что упрочнение микрообъемов поверхностного слоя при периодическом нагружении является сопутствующим процессом и проявляется в гораздо меньшей степени, чем при специальных видах упрочняющей технологии (ППД), то для получения достоверной информации и ее фильтрации от “шумов” следует применять более строгие, аналитические методы проверки нормальности распределения HV согласно программе [4].

Для установления заранее неизвестной оптимальной формы функций $HV=f_1(h)$ и $HV=f_2(d_x)$, которые зависят от уровня перенапряжений и длительности периодического нагружения, необходим выбор альтернативных вариантов линеаризующих функций. Поэтому следует также подобрать такую зависимость, которая удобна для выполнения расчетных оценок исследуемых величин и ее графической интерпретации в приемлемой и доступной системе координат (u, v). Парные проверки вариационных рядов HV, согласно критериям F-Фишера и t-Стьюдента, показали, что периодическое нагружение, уровень перенапряжений и разделение значений HV по зонам разрушения являются основными факторами, оказывающими неслучайное и значимое влияние на величину HV [1,3].

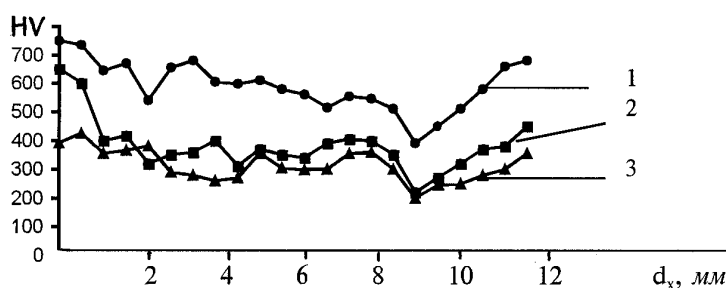


Рис. 3. Распределение HV по диаметральному сечению: 1 – в тонком поверхностном слое излома; 2 и 3 – на расстоянии 0,3 мм и 0,5 мм от края излома

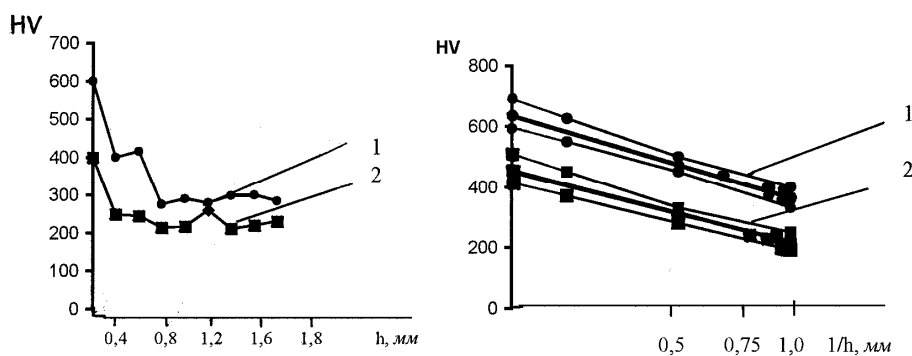


Рис. 4. Распределение значений HV по глубине h : а – 1 и 2 – соответственно хрупкой (X_1) и вязкой (B_1) зон; б – медианные линии регрессии $HV=f(h)$ и их 90%-е доверительные интервалы

Анализ результатов линеаризующих преобразований и выбор оптимальной преобразующей функции показали, что наиболее приемлемыми являются гиперболические функции вида $u_v = a + b_{u/v} v$ ($u_v = y_x$, $v = x^{-n}$, $n=1...5$). В таблице приведены значимости параметров медианных линий регрессии и их 90%-е доверительные интервалы.

Таблица

Значимость параметров медианных линий регрессии и их 90%-е доверительные интервалы

Вид расчетной операции	Параметры	Зона В ₁	Зона Х ₁
Параметры медианной линии регрессии	n	1	1
	u	3,3264	3,6036
	v	3,8020	2,6920
	a	2,3939	1,9557
	b _{u/v}	0,1124	0,0281
	s _{u/v}	0,7071	0,0834
Проверки значимости параметров	r	0,9967	0,9981
	u	1,9405	1,3859
	Z _{0.975} S _u	0,3780	0,3870
	r _s	0,9000	0,9000
	r _{s0.975}	0,9842	0,9744
	t _a	26,5560	42,8840
	t _b	21,2500	28,0530
	t _u	62,2170	72,1840
	t _{0.05k}	3,1820	3,1820
90%-е доверительные интервалы параметров	r ₁ / r ₂	0,9596/0,9998	0,9766/0,9999
	a ₁ / a ₂	2,1070/2,6807	1,8106/2,1008
	b _{u/v1} /b _{u/v2}	0,0955/0,1292	0,0249/0,0313
	u ₁ / u ₂	3,6076/3,9964	2,5733/2,8107

Стремление учитывать максимальный эффект действий микропластических деформаций на вершине трещины и контактного смыкания берегов трещины приводит к выбору диаметрального сечения по оси d_x (рис.2) в качестве плоскости измерения HV и исследования микроструктуры после усталостного разрушения. Изменение HV по данному сечению носит сложный характер и в основном зависит от уровня σ_i (рис.5 а). Максимальные значения функции HV_{max} = f₁(d_x) соответствуют крайним участкам зоны вязкого разрушения В. С переходом к зоне хрупкого разрушения HV_{max} убывают, а в середине зоны Х достигают HV_{min}. Аналогично меняется и функция HV = f₂(d_x). Однако по мере удаления от поверхности излома она становится пологой, и при h = 1,0 ... 1,2 мм восстанавливается исходное состояние: HV = f₂(d_x) = const = HV₀.

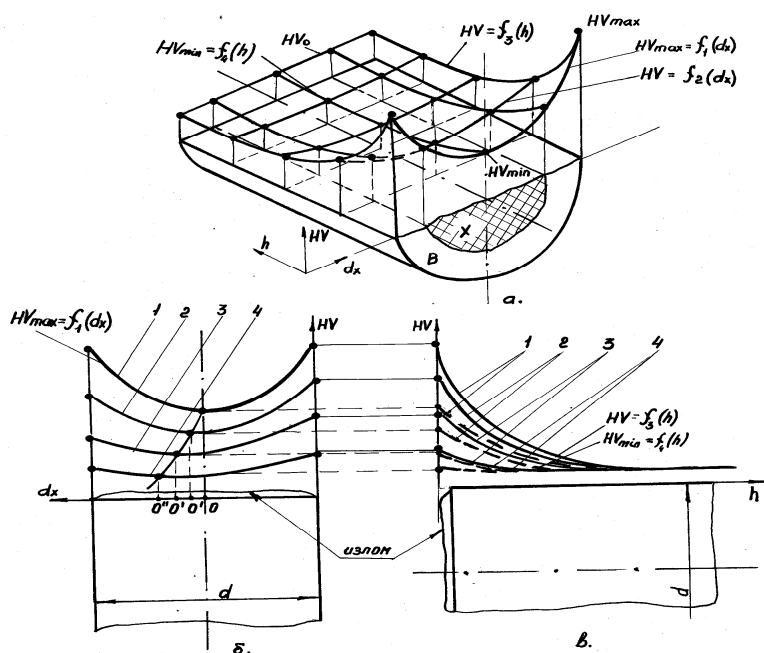


Рис. 5. Распределение HV по диаметальному сечению образца в зоне излома: а - поверхность HV - d_x - h ; б- семейство функций $HV_{max} = f_1(d_x)$; в- семейство функций: $HV = f_3(h)$, — — — — $HV_{min} = f_4(h)$.
Кривые 1...4 соответствуют перенапряжениям $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$

При низких перенапряжениях функции HV_{max} , $HV = f_2(d_x)$ в соответствии с переориентацией зоны долома приобретают асимметричный вид, а максимальные значения HV_{max} убывают (рис. 5б). В перпендикулярном направлении форма кривой $HV = f_3(h)$ носит выраженный гиперболический характер и имеет высокий градиент около поверхности излома, в связи с чем $HV = f_3(h)$ быстро затухает до исходного состояния HV_0 . Здесь можно выделить два семейства кривых $HV = f_3(h)$, соответствующие зонам вязкого и хрупкого разрушений (рис. 5в).

Таким образом, поверхность HV- d_x - h (рис. 5а) не только отражает качественные изменения, происходящие в тонком поверхностном слое излома, но и может стать основой для разработки новой методики по диагностике причин усталостного разрушения. Для этой цели необходимо установить многопараметрические связи между перенапряжениями σ_i , циклической долговечностью N_i и механическими свойствами материала, а также параметрами поверхности HV - d_x - h :

$$\sigma_i = F_1 (HV_{max}, HV_{min}, h, HB, \dots),$$

$$N_i = F_2 (HV_{max}, HV_{min}, h, HB, \dots).$$

На основе накопленной статистической информации об изменении HV в различных зонах усталостного излома и стадиях периодического нагружения можно составить номограммы для диагностирования причин усталостного разрушения тяжело нагруженных и ответственных деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Галечян Н.А.** Использование метода микротвердости для оценки режимов современных упрочняющих технологий деталей машин и процессов трещинообразования // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1996.- Т. 49, ¹ 3.- С. 3-8.
2. **Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Шагаев Ю.П.** Об измерениях микротвердости в зоне усталостного излома //Заводская лаборатория. - 1990. - Т. 56, ¹ 11. - С. 91 - 95.
3. **Стакян М.Г., Шагаев Ю.П., Исаханян Н.С.** О распределении микротвердости при испытаниях на усталость // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1987. - Т. 50, ¹ 5. - С. 3 - 9.
4. **Стакян М.Г., Оганесян Л.Г.** Комплексная программа для корреляционного и регрессионного анализа результатов механических испытаний // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - ¹ 11. - С. 47 - 53.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.03.1998.

Ն.Ա. ՂԱԼԵՉՅԱՆ

ՄԻԿՐՈԿԱՐԾՐՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ԼԻՄԵՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Միջին գերլարվածային գոտում հոգնածային քայքայման ենթարկված լիսեռների բարակ մակերևութային շերտերի ֆիզիկամեխանիկական պարամետրերի և տեխնոլոգիական գործոնների միջև քանակական առնչությունները բացահայտելու և այդ շերտերում ճաքագոյացման գործընթացն ուսումնասիրելու նպատակով իրականացված են միկրոկարծրության զանգվածային չափումներ: Փորձի արդյունքները մշակված են կոռելյացիոն և ռեգրեսիոն վերլուծությամբ, գտնված են նմուշների միկրոկարծրության և խորության ֆունկցիոնալ կապերը, ինչպես նաև բացահայտված է միկրոկարծրության արժեքների փոփոխությունը փորձանմուշների տրամագծային հատույթից գերլարվածության տարբեր մակարդակներում:

N.A. GHALECHYAN

THE ASSESSMENT OF SHAFT'S FATIGUE PROCESS WITH MICROHARDNESS MEASUREMENT METHOD

To establish the quantitative relations between physical, mechanical parameters and technological factors of thin surface of shaft's fatigue fractures at the middle of superstress zones, and to study the crack growing process of this surfaces, mass measurements of microhardness are realized. The test results are obtained by regression and correlation analysis methods. The functional relationships between microhardness and depth are found. The variation of microhardness values by diametrical size on various superstress zones is established.