

М.Г. СТАКЯН, Н.С. ИСАХАНИЯН, Н.А. ГАЛЕЧЯН

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОТВЕРДОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ СОВРЕМЕННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Լազերային ճառագայթման ազդեցության տեղական բնույթի, բարձր ջերմային զրադիենտի և ջերմամշակման արագության շնորհիվ կառուցվածքային պողպատներից պատրաստված պատասխանատու մեքենամասերը ձեռք են բերում զգալի կարծրություն, բան ջերմամշակման հայտնի մեթոդների կիրառման դեպքում: Ճառագայթառաված բարակ մակերևութային շերտերի ֆիզիկամեխանիկական պարամետրերի և տեխնոլոգիական գործոնների միջև քանակական առնչությունները քաջահայտելու և այդ շերտերում ճաքազոյացման գործընթացն ուսումնասիրելու նպատակով իրականացված են միկրոկարծրության զանգվածային չափումներ: Նույն մեթոդով իրականացված է լիսեռների հոգնածային կոտրվածքների քայքայարանական հետազոտություն: Փորձարկումների և միկրոկարծրության չափումների առդյունքները մշակված են հավանականությունների տեսության և մաթեմատիկական վիճակագրության մեթոդներով, քաջահայտված են միկրոկարծրության բաշխման ֆունկցիաները և ստացված են կոռելյացիոն կապեր միկրոկարծրության և մակերևութային շերտերի խորության միջև:

Локальный характер воздействия лазерного луча, сравнительно высокий температурный градиент и скорость термобработки приводят к значительному повышению твердости ответственных деталей машин из конструкционных сталей, чем при известных методах термобработки. Для установления количественных связей между физико-механическими параметрами, технологическими факторами и размерами излученного тонкого поверхностного слоя и исследования в этих слоях процесса трещинообразования произведены массовые измерения микротвердости. Этими же методами реализовано исследование усталостных изломов валов. Результаты измерения микротвердости разработаны методами теории вероятностей и математической статистики, выявлены корреляционные связи между микротвердостью и глубиной поверхностных слоев.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

The local effect of a laser beam due to high thermal gradient and heat treatment speed results in significant increasing the hardness of machine parts made of structural steels than in case of applying the well-known methods of heat treatment. To establish quantitative relations between physical, mechanical and technological parameters of radiated thin surface layers and to study the process of cracking, mass measurements of microhardness have been realized. The investigation of fatigue fractures has been realized by the same method. The results of microhardness measurements are obtained by the method of probability and mathematical statistics, microhardness distribution functions and correlations are found.

Ил. 3. Tables 2. Ref. 6.

Սլոմոնի բոլորիստի թեթևուարձրեցուցու և օտեւտեւենուսի ճեւեւեւի մաշուի (քրուերնո 80 %) քրուեհօւոնք սօւ ճեւեւեւնք քերեւենուսի նարձեւենուսի և ըզուլտաեւեւ քոզնուեւեւեւի և ըզու մաշուեւեւնք և օքսնոնք քոզնուեւեւնք քոզնուեւեւնք մաշուեւեւնք: Կաք քրուեւեւ, էտօ քրուեւեւնք ըզուքաեւեւաեւ քո տոքնօ սօւքնուեւեւնք սլօեւ,

преимущественно в зонах расположения концентраторов напряжений при наличии отдельного или совместно действующих повреждающих факторов.

Это диктует необходимость выполнения наряду с упрочнением поверхностных слоев и зон концентрации напряжений фраттографических исследований, т.к. в строении усталостного излома четко отражены все стадии процесса разрушения, фронта продвижения трещины и степень микропластических деформаций подповерхностных слоев излома.

В ранее выполненных работах [1-3] изучены усталостные изломы образцов, испытанных при высоком и низком уровнях перенапряжений. Для оценки физико-механического состояния поверхностных слоев изломов предложен метод измерения микротвердости HV. В [4] рассмотрено изменение HV при лазерном термоупрочнении торцовых поверхностей деталей. Показано, что процесс лазерной закалки сталей из-за резко выраженного локального характера воздействия лазерного луча и высокого температурного градиента поверхностных слоев приводит к значительному повышению HV, чем при известных методах термообработки.

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. В [5] показана разная степень микропластического деформирования зон вязкого и хрупкого изломов от уровня перенапряжений  $\sigma$ .

Результирующий эффект складывается из двух последовательно протекающих процессов - деформирования микрообъемов на вершине кольцевой сужающейся трещины, зависящего от величины  $\sigma$ , и контактного смыкания берегов трещины, усиливающегося по мере продвижения фронта трещины вглубь опасного сечения детали (зависит от циклической долговечности N). При этом влияние  $\sigma$  на указанный процесс считается преобладающим.

Применение метода микротвердости позволяет установить не только закон распределения HV [2], но и выявить количественные связи между глубиной деформированного поверхностного слоя и параметрами технологического процесса закалки или режимами периодического нагружения. Это важно для определения оптимальных режимов лазерной закалки или диагностирования причин усталостного разрушения закаленных и высокопрочных деталей машин. На поверхностях усталостных изломов этих деталей визуально трудно или вовсе невозможно определить размеры и взаимное расположение зон вязкого и хрупкого разрушения, по которым можно судить о степени перегрузки, предшествующей разрушению.

Материалы данной статьи являются развитием ранее выполненных работ по установлению количественных соотношений между HV и указанными параметрами.

Микроструктурный анализ поверхностных слоев закаленных образцов показывает, что при лазерной термообработке имеются две зоны термического воздействия, которые фактически являются результатом затухания термического режима, вызванного высокой скоростью термообработки и температурным градиентом поверхностных слоев. Первая зона (белый слой) возникает сразу из жидкой фазы металла и имеет дендритную структуру, которая в основном состоит из мартенсита. Глубина зоны колеблется в пределах  $h=(0,1...0,3)$  мм и при повышении скорости перемещения лазерного луча убывает. Вторая зона состоит из

мелкодисперсного мартенсита и его переходных фаз с незначительным количеством аустенита. На глубине  $h > 1,0 \dots 1,2$  мм устанавливается исходное состояние микроструктуры.

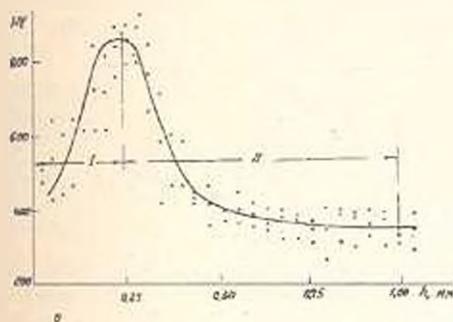


Рис. 1. Распределение микротвердости в поверхностном слое при лазерном термоупрочнении стали 40X

Характер изменения HV соответствует вариации составляющих микроструктуры - из-за наличия на поверхности оплавленного дефектного слоя ( $h=0,001 \dots 0,003$  мм) микротвердость достигает максимума на стыке зон I и II (рис.1) и затем убывает до исходного значения. Шероховатость обработанной поверхности изменяется в пределах  $R_z=45 \dots 65$  мкм. При этом на поверхности имеются гранулы, полученные после оплавления, которые исчезают с увеличением скорости обработки. Это вызывает необходимость для получения точных сопряженных поверхностей после лазерной закалки выполнения дополнительной финишной обработки для удаления дефектного слоя.

Установление количественных соотношений между изучаемыми параметрами реализовано согласно программе [6]. В [4] выбраны оптимальные линеаризующие системы координат, обеспечивающие значения выборочного коэффициента корреляции  $|r|=0,795 \dots 0,948$  и позволяющие связь  $HV=f(h)$  выразить в виде степенных функций (рис. 2):

$$\overline{HV}_I = a_1 + b_1 h^2, \quad \overline{HV}_{II} = a_2 + b_2 h^{-1} \quad (1)$$

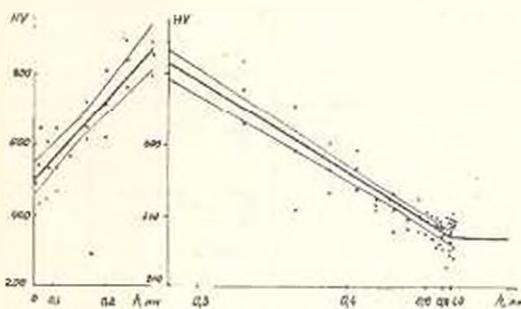


Рис. 2. Медианные линии регрессии и их 90%-ые доверительные границы: 1 - в зоне I (коорд. система  $HV \cdot h^2$ ); 2 - в зоне II (коорд. система  $HV \cdot 1/h^3$ )

Аналогичными методами исследованы усталостные изломы образцов с концентратором напряжений (стали 45, нормализация,  $\sigma_n=680$  МПа,  $\sigma_T=427$  МПа,  $HV=195 \dots 210$ ,  $d=12$  мм, одностороннее отверстие под установочный винт,  $d_0=2$  мм,  $\omega=118^\circ$ ,  $\alpha_n=2,95$ ), испытанных при

совместном действии кругового изгиба и кручения на уровнях перенапряжений  $\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$  и  $\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$ .

Тонкий поверхностный слой излома при этом представляет наибольший интерес, т.к. несущая способность, прочность и долговечность деталей машины обусловлены сопротивлением усталости, трещино- и износостойкостью этих же слоев, которые, в свою очередь, связаны с НВ. Фрактографический анализ изломов показал, что в тонком поверхностном слое зерна металла получают направленную пластическую деформацию, которая распространяется на глубину 0,2...0,3 мм. Изменяется также соотношение составляющих микроструктуры. На граничной зоне преобладает ферритная фаза, так как от периодического контактного смятия происходит вдавливание более твердых перлитных зерен, и лишь при  $h=0,4...0,5 \text{ мм}$  устанавливается исходное соотношение ферритной и перлитной фаз.

Учитывая различный механизм протекания процессов деформирования в зонах вязкого (В) и хрупкого (Х) разрушения, расчетная оценка НВ в этих зонах произведена отдельно. Для установления оптимальной формы связи  $HV=f(h)$ , которая заранее не известна, необходим выбор альтернативных вариантов линеаризующих функций, который реализован согласно [6].

Таблица 1

Значения $ r_{\max} $ для альтернативных систем координат u-v							
$\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$				$\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$			
Зона В <sub>1</sub>		Зона Х <sub>1</sub>		Зона В <sub>2</sub>		Зона Х <sub>2</sub>	
u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $
y-1/x	0,891... 0,999	y-1/x <sup>n</sup> n=1, 2	0,961... 0,999	y-1/x	0,801... 0,999	y-1/x	0,863... 0,998
lgy-1/x	0,821... 0,997	lgy-1/x <sup>n</sup> n=1, 2	0,924... 0,996	lgy-1/x	0,794... 0,995	lg(y+g)- lgx	0,732... 0,996
1/y-1/x	0,893... 0,988	1/y-1/x	0,847... 0,993	lgy- lg(x+y)	0,722... 0,987	lgy- lg(x+g)	0,892... 0,996
1/y <sup>n</sup> -lgx, n=1, ..., 3	0,710... 0,982	1/y <sup>n</sup> -lgx, n=1, ..., 5	0,769... 0,983	1/y <sup>n</sup> -lgx, n=1, 5	0,577... 0,985	1/y <sup>n</sup> -x, n=5	0,666... 0,995
lgy- lg(x+g)	0,709... 0,979	lgy- lg(x+g)	0,863... 0,968	1/y-1/x	0,786... 0,978	lgy-1/x	0,811... 0,985
lg(y+g)- lgx	0,851... 0,970	lg(y+g)- lgx	0,797... 0,941	lg(y+g)- lgx	0,618... 0,974	1/y <sup>n</sup> -lgx, n=2, ..., 5	0,896... 0,985
1/y <sup>n</sup> -x, n=3, 5	0,655... 0,963	1/y <sup>n</sup> -x, n=3, 5	0,468... 0,953	1/y <sup>n</sup> -x, n=5	0,502... 0,952	1/y-1/e <sup>x</sup>	0,647... 0,981
1/y-1/e <sup>x</sup>	0,700... 0,915	1/y-1/e <sup>x</sup>	0,530... 0,800	1/y-1/e <sup>x</sup>	0,512... 0,911	1/y-1/x	0,807... 0,961
y-1/e <sup>x</sup>	0,597... 0,823	y-1/e <sup>x</sup>	0,522... 0,697	y-1/e <sup>x</sup>	0,527... 0,837	lgy-x	0,530... 0,947
lgy-x	0,589... 0,791	lgy-x	0,474... 0,631	lgy-x	0,498... 0,832	y-1/e <sup>x</sup>	0,543... 0,918

Значения  $r_{\max}$  для первых 10 видов линеаризующих функций, распределенных по мере убывания (табл.1), указывают на наличие большого количества альтернативных систем координат u-v, обеспечивающих условие

$|r| > 0,75$ . Наиболее универсальной для всех рассмотренных случаев является система  $y = 1/x^n$ ,  $n = 1, 2$ , для которой  $|r| = 0,800 \dots 0,999$ . Следовательно, связь  $NV = f(h)$  можно описать гиперболическими функциями типа

$$y = a + b_{u/v} x^{-n}, \quad n = 1, 2 \quad (u = y, v = x^{-n}). \quad (2)$$

Учитывая ранее неизвестный характер распределения  $NV$  по глубине  $h$ , произведен комплекс проверок статистической значимости параметров медианной линии регрессии с определением 90 %-ых доверительных границ этих параметров и самой линии (табл. 2, рис. 3). Как видно, проверки удовлетворены при достаточно большом "запасе" уровня значимости, который значительно перекрывает критериальные значения  $\alpha$  (табл. 2).

Таблица 2

Вид расчетной операции		$\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$		$\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$	
		Зона В <sub>1</sub>	Зона X <sub>1</sub>	Зона В <sub>2</sub>	Зона X <sub>2</sub>
Параметры медианной линии регрессии	$\bar{u}$	2,9025	2,5690	2,4020	2,1140
	$\bar{v}$	6,9472	10,2975	19,5815	15,1636
	$a$	1,8591	1,7947	1,6674	1,7555
	$b_{u/v}$	0,1502	0,0752	0,0375	0,0236
	$S_{u/v}$	0,2827	0,0687	0,1448	0,0821
	$ r $	0,9813	0,9983	0,9927	0,9942
Проверки значимости параметров	$u$	2,3768	3,5845	2,8567	2,9778
	$z_{0,975} \cdot S_u$	0,3333	0,3780	0,3780	0,3780
	$ r_s $	0,9277	0,9758	0,7842	0,8909
	$r_{0,975}$	0,5800	0,6360	0,6360	0,6360
	$t_u$	17,856	66,375	29,954	59,794
	$t_v$	16,134	48,171	23,206	26,214
	$t_{u/v}$	35,569	118,166	52,460	81,377
$t_{0,05,k}$	2,228	2,306	2,306	2,306	
90%-е доверительные интервалы параметров	$\underline{r}_1$	0,9383	0,9932	0,9516	0,9775
	$\underline{r}_2$	0,9953	0,9997	0,9964	0,9988
	$\underline{a}_1$	1,6272	1,7323	1,5390	1,6878
	$\underline{a}_2$	2,0911	1,8570	1,7957	1,8232
	$\underline{b_{u/v1}}$	0,1294	0,0716	0,0338	0,0216
	$\underline{b_{u/v2}}$	0,1709	0,0788	0,0412	0,0257
	$\underline{u}_1$	2,7207	2,5189	2,2964	2,0541
	$\underline{u}_2$	3,0843	2,6191	2,5076	2,1739

Микропластические деформации на вершине кольцевой трещины и последующее контактное смыкание в совокупности приводят к тому, что максимальные значения микротвердостей имеют место на граничных участках зон В и X, а совместное действие указанных видов деформации в

зоне В - к условию  $HV_{maxB} > HV_{maxX}$ , которое зависит от уровня перенапряжений  $\sigma$  и долговечностей  $N$ . Поэтому накопление статистической информации об изменении  $HV$  в различных зонах усталостного излома позволит выявить многопараметрические зависимости:

$$\sigma = F_1(HV_{maxB}, HV_{maxX}, h, HB, \dots), \quad (3)$$

$$N = F_2(HV_{maxB}, HV_{maxX}, h, HB, \dots),$$

а на их основе составить номограммы для диагностирования причин усталостного разрушения тяжело нагруженных и ответственных деталей машин.

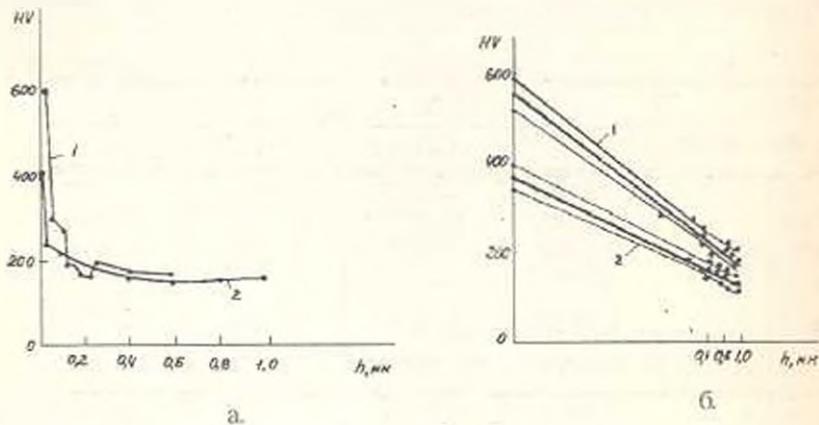


Рис. 3.

а - распределение микротвердости в зонах усталостного излома при  $\sigma_1 = 350$  МПа:

1 - вязкого разрушения ( $B_1$ ), 2 - хрупкого разрушения  $X_1$ .

б - медианные линии регрессии и их 90%-ые доверительные границы при  $\sigma = 350$  МПа (коорд. система HV-1/h) в зонах 1-  $B_1$ , 2-  $X_1$ .

(Работа выполнена в рамках финансируемой госбюджетной научной темы РА № 96-362.)

## ЛИТЕРАТУРА

- Шагаев Ю.П., Стакян М.Г., Исаханян Н.С. Измерение микротвердости в процессе усталостного повреждения для оценки работоспособности изделий // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1985. - Т. 38, № 4. - С. 18-24.
- Стакян М.Г., Шагаев Ю.П., Исаханян Н.С. О распределении микротвердости при испытаниях на усталость // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1987. - Т. 40, № 5. - С. 3-9.
- Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Шагаев Ю.П. Об измерениях микротвердости в зоне усталостного излома // Заводская лаборатория. - 1990. - Т. 56, № 11. - С. 91-95.
- Стакян М.Г., Ерицян С.Л. О распределении микротвердости при лазерном термоупрочнении стали 40 X // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1985. - Т. 48, № 3. - С. 5-9.
- Олейник Н.В., Стакян М.Г., Исаханян Н.С. Современные физико-механические методы исследования процесса усталостного разрушения тяжело нагруженных деталей машин // Надежность и долговечность машин и сооружений: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1989. - Вып. 16. - С. 18-27.
- Стакян М.Г., Оганесян Л.Г. Комплексная программа для корреляционного и регрессионного анализа результатов механических испытаний // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 11. - С. 47-53.

ГИУА

3.11.1995