

## **Исследование закономерностей изменения стохастических свойств титановых сплавов при циклическом нагружении**

**Г. Г. Писаренко, А. В. Войналович, Ю. М. Голованев, И. М. Васинюк**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен подход к анализу долговечности титановых сплавов, в котором в дополнение к известному, учитывающему статистические закономерности сопротивления усталости, используются характеристические параметры неоднородности физико-механических свойств металла.*

Неоднородность строения поверхностных слоев металла решающим образом влияет на закономерности процесса циклического деформирования и определяет разброс характеристик сопротивления усталости как статистических величин [1–3]. С понижением амплитуды циклической нагрузки уменьшается вероятность развития повреждения в отдельном структурном элементе и возрастает степень неопределенности начального места развития усталостного повреждения, что проявляется в увеличении дисперсии результатов усталостных испытаний [4]. Это увеличение при росте средней долговечности до разрушения обуславливает необходимость использования статистических методов обработки данных испытаний для построения характеристических закономерностей изменения сопротивления усталости с определением доверительных интервалов.

Неучет наличия большого рассеяния долговечности образцов при уровнях циклической нагрузки, близких к пределу выносливости на больших базах нагружения, обнаруживается в появлении разрывов кривых усталости металлических сплавов [5, 6]. Отметим, что увеличение базы испытаний до  $10^9 \dots 10^{10}$  цикл не приводит к дальнейшему монотонному росту дисперсии долговечности [7], что свидетельствует о дискретности микрообъемов, неоднородность свойств которых определяет рассеяние макроскопических характеристик сопротивления усталости.

Из этого следует, что факт разброса результатов усталостных испытаний титановых сплавов не может быть использован для однозначной характеристики кинетики физико-механического состояния материала при циклическом воздействии силовых факторов, так как процесс рассеяния долговечностей хотя и случаен, однако не содержит признаков стационарности.

Поэтому для прогнозирования ресурса элементов конструкций, подвергающихся воздействию циклической нагрузки малых уровней, необходимо применение комплексного подхода, в котором наряду со статистическими характеристиками сопротивления усталости должны использоваться характеристические параметры микрон неоднородности строения поверхностных слоев металла.

Известно, что рассеяние механических характеристик металла, определяющих статическую и длительную прочность, пластичность, твердость,

сопротивление усталости, трещиностойкость и т.п., определяется неоднородностью физико-механических свойств его локальных объемов [3, 8, 9]. Однако заметим, что практически все методы механических испытаний, не связанные с локальным нагружением материала, а таких большинство, являются интегральными, т.е. нивелирующими особенности механического состояния локальных объемов материала. Если принять эту предпосылку, то сделанный выше вывод может быть конкретизирован за счет формулировки его метрологических параметров.

В развитие методов оценки структурной неоднородности в работе предложен подход дифференцированного контроля физико-механических характеристик структурных элементов конструкционных материалов, реализованный на примере титановых сплавов ВТ18 и ОТ4-ОМ с различной пластичностью.

Данный подход базируется на методе, объединяющем преимущества традиционных методов локального нагружения и метода упругих волн. Метод реализуется без разрушения структурных элементов с помощью резонансного индентора, возбуждающего в материале переменные деформации так, что объем активации ограничен зоной вдоль направления распространения волны в пределах десяти величин среднего размера структурного элемента исследуемого материала. Площадь активированной поверхности определяется величиной радиуса контактных поверхностей. Указанная локализация активированного объема материала обеспечивает метрологические параметры измерительной системы, необходимые для определения характеристических параметров состояния структурных элементов исследуемого конструкционного материала методами статистического анализа.

Ниже проанализированы результаты многоканальных измерений угла сдвига фаз между прямой и отраженной упругими волнами, полученные при контроле по параллельной схеме в нескольких точках поверхности, которые расположены вблизи опасного сечения консольного образца при усталостных испытаниях в резонансном режиме на первой форме колебаний (уровни циклических напряжений выбраны на 20% выше пределов выносливости исследованных титановых сплавов). В каждой точке получены результаты 20 измерений с интервалом 5 с между измерениями для компенсации релаксационных влияний измерительной системы.

Для тестирования адекватности предложенного методологического подхода проведены измерения текущих значений характеристического параметра при усталостных испытаниях образцов. В качестве критерия поврежденности образца выбран критерий относительного изменения частоты резонансных колебаний от 0 до 1,75% на стадиях возникновения и развития усталостной трещины. Диапазон изменения резонансной частоты испытаний был разбит на несколько участков. Нагружение образца продолжали до достижения частотой заданного значения. Затем испытания прекращали и проводили повторные измерения по описанной выше схеме в тех же точках поверхности образца, где были сделаны начальные контрольные замеры.

При статистической обработке полученных результатов проанализированы следующие параметры структурной неоднородности исследуемого материала: среднее значение, дисперсия, эксцесс, стандартное отклонение,

асимметрия распределения и медиана. Эти данные представлены в табл. 1 и 2 для ряда значений угла сдвига фаз, выраженных величиной электрического аналога в виде абсолютной величины интенсивности  $I_{э.а}$ .

Т а б л и ц а 1

**Статистические характеристики структурной неоднородности на поверхности образцов титанового сплава ОТ4-ОМ**

Уменьшение резонансной частоты, %	Номер точки на поверхности образца	$I_{э.а}$	Дисперсия $D$	Показатель эксцесса $E$	Стандартное отклонение $\Delta$	Асимметрия распределения $r$	Медиана $m$
0	1	15,54	11,70	-1,01	3,41	0,33	16,05
	2	19,33	11,46	-1,41	3,38	-0,05	18,95
	3	19,18	16,58	-2,01	4,07	-0,24	20,50
	4	17,88	13,51	-1,27	3,67	0,86	15,70
0,25	1	16,87	3,12	1,22	1,76	-0,65	17,00
	2	18,14	3,19	-1,20	1,78	-0,21	18,30
	3	16,01	5,97	4,69	2,44	-1,88	16,75
	4	14,63	6,05	-0,68	2,46	-0,84	15,40
0,75	1	14,33	2,52	-0,54	1,59	-0,68	14,80
	2	16,27	4,90	-0,67	2,21	0,63	15,70
	3	16,47	3,58	-0,20	1,89	-0,35	16,95
	4	17,13	2,95	-0,62	1,72	-0,79	17,70
1,25	1	14,89	5,78	-1,12	2,40	0,45	13,90
	2	14,76	4,01	-0,41	2,00	0,35	14,70
	3	16,15	7,52	-0,35	2,74	0,71	15,70
	4	15,78	2,96	-1,89	1,72	0,01	15,65
1,75	1	8,08	4,08	0,26	2,02	0,42	7,35
	2	8,68	1,32	-1,15	1,14	0,08	8,60
	3	7,70	7,70	3,52	2,78	-1,84	8,50
	4	2,20	2,20	-1,64	1,48	0,07	8,60

Следует отметить, что результаты измерения характеристического параметра каждого локального объема металла, отображающие физико-механические свойства в определенном направлении, можно интерпретировать как результат испытания макрообразца. Таким образом, с помощью этих данных (табл. 1 и 2) можно оценить степень неоднородности свойств материала, адекватных напряженному состоянию поверхностных слоев металла [10], измеренных как в окрестности отдельных точек (рис. 1), так и обобщенно по всей поверхности образца анализируемого материала (рис. 2).

Сравнительный анализ измеренных параметров показал, что дифференцированный подход к структурной неоднородности титановых сплавов BT18 и ОТ4-ОМ дает оценку состояния материала, адекватную традиционным представлениям о физико-механических свойствах материала, а кинетика характеристического параметра соответствует изменению характеристик, традиционно измеряемых интегральными методами (рассеяние

энергии, гистерезисные потери и др.) [11, 12]. Таким образом, предложенный подход дает адекватную оценку состояния материала и его изменения под действием циклического деформирования.

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики структурной неоднородности на поверхности образцов титанового сплава ВТ18

Уменьшение резонансной частоты, %	Номер точки на поверхности образца	$I_{э,а}$	Дисперсия $D$	Показатель эксцесса $E$	Стандартное отклонение $\Delta$	Асимметрия распределения $r$	Медиана $m$
0	1	22,61	29,36	-1,15	5,42	-0,53	24,05
	2	22,62	35,75	-1,06	5,98	-0,39	23,15
	3	19,74	33,27	-1,41	5,76	-0,02	20,65
	4	22,35	27,57	0,28	5,25	0,49	21,45
	5	25,69	31,50	-0,61	5,61	0,01	26,00
	6	27,37	26,16	3,54	5,11	-1,85	29,25
	7	24,07	27,86	-0,25	5,27	-0,83	25,90
	8	24,75	24,20	1,17	4,91	-1,12	25,15
0,25	1	27,22	12,66	0,35	3,56	0,89	26,65
	2	24,92	18,84	-0,89	4,34	-0,21	24,65
	3	27,37	13,56	-0,54	3,68	0,27	27,80
	4	24,60	17,83	-0,31	4,22	-0,21	24,30
	5	22,17	15,87	-0,58	3,98	0,42	22,20
	6	26,79	10,44	2,00	3,23	-1,69	27,90
	7	26,49	8,52	0,24	2,92	-0,87	27,05
	8	25,55	14,36	-0,42	3,79	-0,98	26,30
0,75	1	23,70	4,88	-0,25	2,21	0,24	23,45
	2	23,39	15,17	-1,41	3,90	0,07	23,25
	3	19,81	11,94	-0,23	3,46	0,84	18,10
	4	21,73	1,77	-1,47	1,33	0,26	21,70
	5	18,66	11,71	-0,14	3,42	-0,71	19,55
	6	22,32	2,97	-1,19	1,72	-0,22	22,75
	7	23,34	10,65	-0,57	3,26	-0,67	24,30
	8	21,58	11,40	-1,08	3,38	-0,60	22,10
1,5	1	20,70	3,06	-0,91	1,75	0,19	20,55
	2	20,83	5,46	-0,12	2,33	0,34	20,70
	3	17,98	8,68	-1,98	2,94	-0,26	19,10
	4	18,03	8,05	-2,08	2,84	-0,11	18,60
	5	15,14	10,09	-0,17	3,17	0,08	14,75
	6	19,32	4,07	2,74	2,02	-0,93	19,60
	7	20,95	2,14	1,36	1,46	-0,08	21,15
	8	17,85	5,42	-0,11	2,33	-0,11	17,90

Для феноменологического анализа кинетических характеристик неоднородности исследованных материалов построены пространственные диаграммы, связывающие структурное состояние материала с контролируемыми параметрами эксперимента при изменении параметров усталостных испы-

таний. Такие пространственные диаграммы средних значений электрического аналога угла сдвига фаз в локальных структурных объемах металла построены для ряда значений изменения резонансной частоты нагружения, что соответствует относительному числу циклов до разрушения образца от 0 до 0,9, и дискретных точек контролируемой поверхности.

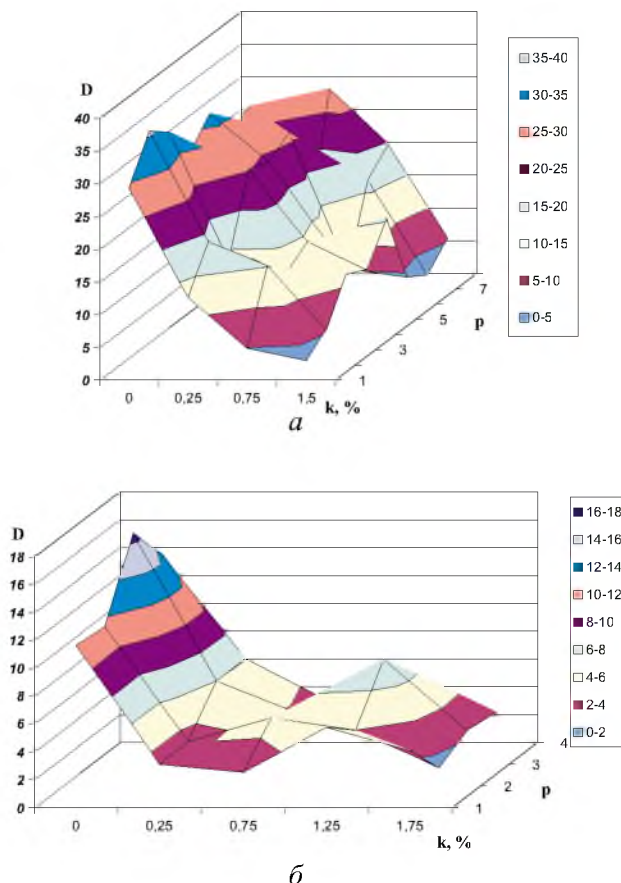


Рис. 1. Зависимость дисперсии  $D$  интенсивности электрического аналога угла сдвига фаз упругой волны в локальных объемах  $p$  поверхностного слоя образцов сплавов VT18 (а) и OT4-OM (б) от величины изменения резонансной частоты нагружения  $k$ .

Двухкоординатные зависимости средних значений электрического аналога угла сдвига фаз от величины изменения резонансной частоты нагружения для исследуемых точек поверхности образцов титановых сплавов VT18 и OT4-OM представлены на рис. 3.

Указанные сплавы характеризуются различной степенью пластичности, что должно сказываться на интенсивности релаксации внутренних напряжений в характерных структурных элементах металла. Видно, что начальная неоднородность параметров структурных элементов в окрестности точек измерения, проявляющаяся в разности углов сдвига фаз в пределах контролируемой площадки образца, нивелируется интенсивнее к моменту возникновения магистральной трещины для более пластического сплава OT4-OM.

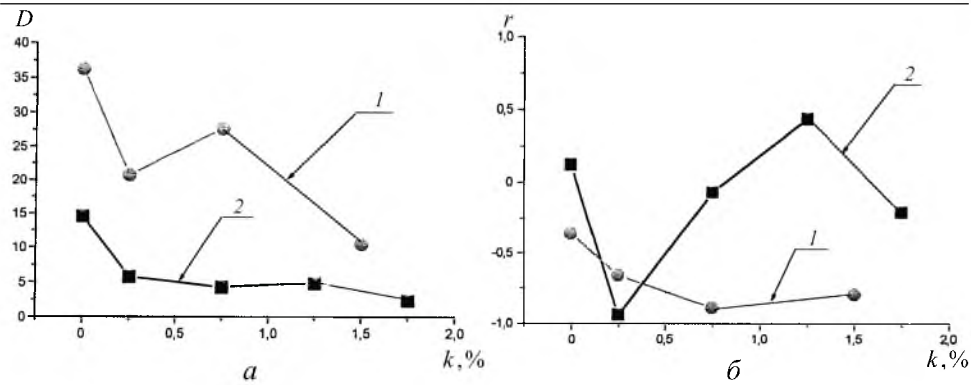


Рис. 2. Зависимость дисперсии  $D$  (а) и асимметрии распределения  $r$  (б) интенсивности электрического аналога угла сдвига фаз упругой волны в поверхностном слое образцов титановых сплавов ВТ18 (1) и ОТ4-ОМ (2) от величины изменения резонансной частоты нагружения  $k$ .

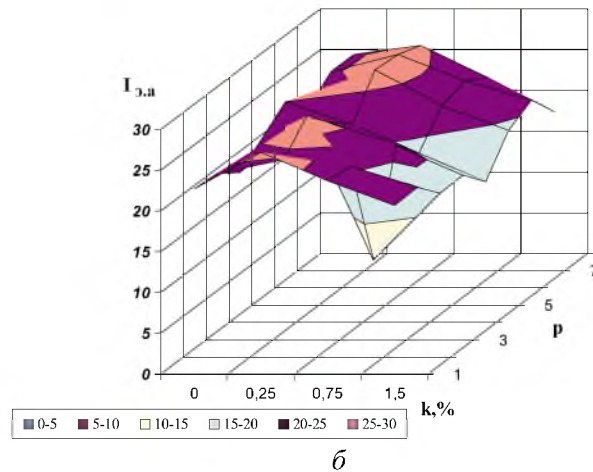
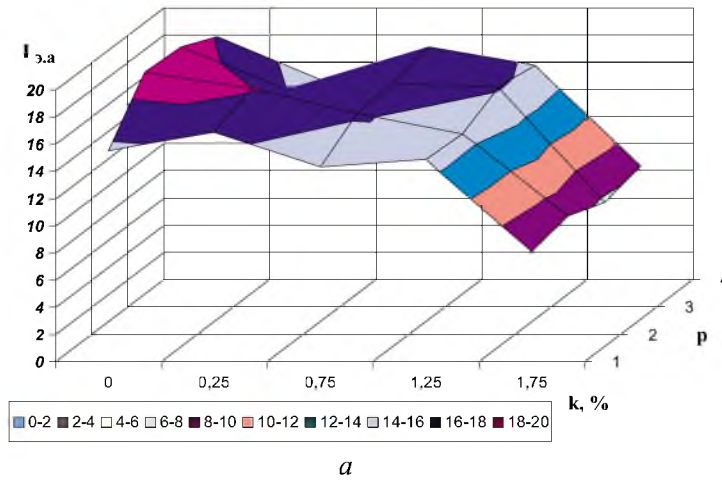


Рис. 3. Зависимость средних значений интенсивности электрического аналога угла сдвига фаз упругой волны ( $I_{э,а}$ ) в локальных объемах  $p$  поверхностного слоя образцов титановых сплавов ОТ4-ОМ (а) и ВТ18 (б) от величины изменения резонансной частоты нагружения  $k$ .

Локальные объемы материала в пределах объема приповерхностного слоя материала обладают определенной неоднородностью, описываемой дисперсией, изменяющейся для имеющегося массива данных на 10%. Абсолютная величина этой неоднородности меньше для материала более пластичного, что также закономерно характеризует способность материала к релаксационным межзерненным процессам.

Независимо от расположения точек измерения в пределах контролируемой площадки образца характеристические поверхности средних значений угла сдвига фаз имеют максимум при изменении внутреннего состояния структурных элементов металла от момента начала циклического нагружения до момента разрушения образца. При этом указанная закономерность более выражена для сплава ВТ18, а для сплава ОТ4-ОМ на стадии начального накопления микроструктурных изменений (изменение резонансной частоты нагружения около 0,25%) наблюдается уменьшение угла сдвига фаз относительно исходного состояния.

Полученные закономерности качественно близки к кинетическим зависимостям некоторых параметров тонкой структуры (относительная плотность подвижных дислокаций, относительная длина дислокационных сегментов)  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов, полученным по результатам измерения внутреннего трения при различных значениях относительного числа циклов до разрушения [13]. Это обстоятельство позволяет использовать предложенную методику для исследования эволюции внутреннего состояния микроструктурных элементов в процессе накопления повреждений при циклическом нагружении, а также для количественной оценки изначальной неоднородности в элементах структуры металла. Показано, что в последнем случае параметры распределения средних значений угла сдвига фаз для точек контролируемой площадки должны коррелировать с параметрами разброса тех механических характеристик исследованных сплавов, которые получены в результате испытаний, где влиянием других факторов, кроме структурной неоднородности, можно пренебречь. Такое соответствие контролируемых параметров фундаментальным свойствам материала свидетельствует о корректности описанного подхода.

## Выводы

1. Обнаружена идентичность статистических характеристик физико-механических свойств титановых сплавов ВТ18 и ОТ4-ОМ, измеренных для локальных объемов материала и макрообразцов.

2. Показано, что дифференцированный подход к структурной неоднородности титановых сплавов дает оценку состояния поврежденности материала, адекватную традиционным представлениям о закономерностях изменения физико-механических свойств материала.

3. Установлено, что начальная неоднородность параметров структурных элементов в окрестности точек измерения, проявляющаяся в разности углов сдвига фаз волн упругих деформаций материала, нивелируется интенсивнее к моменту возникновения магистральной трещины для более пластичных сплавов.

## Резюме

Запропоновано підхід до аналізу довговічності титанових сплавів, у якому додатково до відомого, що враховує статистичні закономірності опору втомі, використовують характеристичні параметри неоднорідності фізико-механічних властивостей металу.

1. *Alus H., Bussiba A., Katz Y., and Gerberich W. W.* Early fatigue damage and residual stresses in polycrystalline copper: A scanning probe microscopy study // *Scr. Mater.* – 1998. – **39**, No. 12 – P. 1669 – 1674.
2. *Qiao Yu and Hong Youshi.* A stochastic model for evolution of collective short-fatigue-cracks on local field analysis // *Acta Mech. Sin.* – 1998. – **30**, No. 5. – P. 564 – 571.
3. *Троценко В. Т., Красовский А. Я., Покровский В. В., и др.* Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 701 с.
4. *Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В.* Усталость легких конструкционных сплавов. – М.: Машиностроение, 1973. – 317 с.
5. *Murakami Y., Takada M., and Toriyama T.* Super-long life tension–compression fatigue properties of quenched and tempered 0.46% carbon steel // *Int. J. Fatigue.* – 1998. – **20**, No. 9. – P. 661 – 667.
6. *Ботвина Л. Р.* Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 228 с.
7. *Матохнюк Л. Е., Войналович А. В., Яковлева Т. Ю., Микишев А. Н.* Влияние наводороживания на сопротивление усталости титанового сплава ПТ-7М // *Пробл. прочности.* – 1988. – № 8. – С. 70 – 75.
8. *Серенсен С. В., Филатов В. М.* Накопление повреждений при повторном упругопластическом нагружении // *Машиноведение.* – 1972. – № 2. – С. 67 – 78.
9. *Богачев И. Н., Вайнштейн А. А., Волков С. Д.* Статистическое металлостроение. – М.: Металлургия, 1984. – 176 с.
10. *Кристал М. А., Костин В. И., Слоневский Ю. Н.* Измерение модулей упругости третьего порядка с помощью волн Рэлея // *Дефектоскопия.* – 1987. – № 6. – С. 19 – 24.
11. *Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Покровский В. В. и др.* Циклические деформации и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 215 с.
12. *Пушкар А., Головин С. А., Тихонова И. В.* Влияние циклического нагружения на внутреннее трение малоуглеродистой стали // *Пробл. прочности.* – 1981. – № 4. – С. 95 – 99.
13. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.

Поступила 14. 03. 2000