

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ УСТАЛОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТТ5В

Полученная характеристика локальной неупругости позволяет контролировать кинетику повреждаемости титанового сплава ТТ5В, косвенно выраженной через ее статистические характеристики распределения на поверхности образца исследуемого материала. Предельное состояние конструкционного материала может быть определено из характеристики упрочнения, как уменьшение интенсивности упрочнения до граничного значения.

Ключевые слова: неупругость, повреждаемость, микропластическая деформация, циклическое деформирование.

Структура конструкционного материала под действием приложенной циклической нагрузки эволюционируют с каждым циклом нагружения, что проявляется в изменении его физико-механических свойств [1]. Разрушение материала при усталости связано с необратимыми структурными изменениями, которые накапливаются в объеме поликристаллического материала по мере наработки. В качестве количественной меры необратимых структурных изменений используется поврежденность, которая может быть выражена через определенный характеристический параметр. В качестве такого может быть принята величина пластической деформации на разных структурных уровнях (микро-, мезо-, макро-). В процесс пластического деформирования сначала вовлекаются микроструктурные уровни, а по мере наработки – более высокие. Поскольку пластическая деформация развивается локально-избирательно в объеме поликристаллического материала, ее мгновенно характеризует степень поврежденности, которую количественно можно представить параметрами статистического распределения микропластической деформации. В процессе деформирования происходит ее перераспределение по объему материала. Характеристика распределения микропластической деформации под нагрузкой (кинетическая характеристика) соответствует поврежденности конструкционного материала. Повреждаемость поликристаллического материала в условиях циклического деформирования является процессом накопления микропластической деформации в объеме материала, что проявляется как изменение величины нелинейности процесса деформирования. В работе [2] конструкционный материал рассматривается как диссипативная многоуровневая структура, для описания которой используют синергетические подходы и фрактальную параметризацию.

В качестве характеристики нелинейности в условиях циклического деформирования в работах [3, 4] используется неупругость. Кинетическая характеристика неупругости полученная с помощью известных методов

(динамической петли гистерезиса, свободных затухающих колебаний, резонансной кривой, Кимбала-Лазана и др.) имеет монотонно-стадийный характер. На такой кинетической характеристике выделяют три стадии: на начальной стадии деформирования возрастание значений кинетической характеристики или ее убывание (в зависимости от того, материал упрочняется или разупрочняется), период стабилизированного значения кинетической характеристики и перед разрушением снова происходит ее возрастание или убывание. Описанная стадийность характеристики неупругости соответствует различной поврежденности конструкционного материала: I – инкубационная стадия; II – стадия стабилизированного накопления повреждений (развитие микротрещин); III – интенсивного накопления повреждений (перед разрушением). Такая кинетика процесса является интегральной характеристикой повреждаемости конструкционного материала и в полной мере не описывает ее кинетику в соответствии с физическими процессами деформирования материала на структурных уровнях [5] и не обеспечивает в необходимой степени контроль процесса повреждаемости.

Следовательно, представляется актуальной необходимостью развития подходов которые позволяют контролировать явления характеризующие кинетику деформирования конструкционного материала в соответствие его структурным уровням (макро-, мезо-, микро-) [6]. К таким относится метод представленный в работах [7, 8] который заключается в следующем: поверхность цилиндрического образца располагаются в зоне с однородным распределением циклических нагрузок, разбивается на участки площадью $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. В каждой точке определяются характеристики нелинейности циклического деформирования по параметру сдвига фаз между величиной прикладываемого напряжения и деформацией материала в зоне контакта при ассиметричном нагружении с амплитудой относительных циклических деформаций 10^{-3} . Результаты статистических измерений неупругости стандартных образцов сплава ПТ5В для усталостных испытаний представлены в таблице.

Результаты измерений угла сдвига фаз

№ выборки	№ измерения угла сдвига фаз φ									
	1	2	3	4	...	437	438	439	440	
1	0,74	0,74	0,84	0,87	...	0,77	0,78	0,86	0,78	
2	0,89	0,82	0,8	0,86	...	0,81	0,85	0,78	0,84	
3	0,86	0,90	0,88	0,90	...	0,94	0,93	0,9	0,78	
4	0,96	0,90	0,97	1	...	0,99	0,94	0,97	0,99	
Шаг измерения δ , мкм	0	50	100	150	...	$21,8 \cdot 10^3$	$21,85 \cdot 10^3$	$21,9 \cdot 10^3$	$21,95 \cdot 10^3$	

Общее число измерений составило 1760 значений угла сдвига фаз. С целью повышения достоверности данных процесс измерения и их обработка выполнена в автоматическом режиме. В качестве параметра неоднородности полученной выборки данных выбрана величина относительной дисперсии.

На рис. 1 представлена характеристика описывающая кинетику локальной неупругости титанового сплава ТТ5В при уровне циклических напряжений 300 МПа и симметричном цикле нагружения растяжением-сжатием.

Кинетическая характеристика (рис. 1) изменяется немонотонно во всем диапазоне долговечности с определенной циклическостью экстремумов (последовательность минимумов и максимумов). Минимумы на характеристике соответствуют гомогенизации структуры по отношению к максимумам данной характеристики. Следовательно, минимумы кинетической характеристики неупругости соответствуют состоянию упрочнения конструкционного материала, а максимумы описывают его разупрочнение.

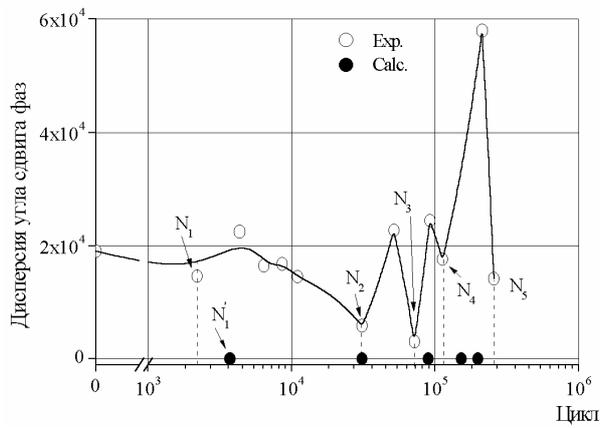


Рис. 1. Характеристика распределения локальной неупругости сплава ТТ5В: Calc. – расчетный ряд; Exp. – экспериментальный ряд.

Анализ характеристики распределения локальной неупругости позволяет установить следующую закономерность, которая отображена характеристикой на рис. 2. Сопоставляя амплитудные значения дисперсии угла сдвига фаз соответствующие экстремумам упрочнения (N_1, \dots, N_5) с последующими максимумами разупрочнения получено следующую характеристику (рис. 2), описывающую кинетику интенсивности упрочнения исследуемого материала. На начальном этапе нагружения материал имеет максимальную интенсивность упрочнения, которая уменьшается по мере наработки. Снижение характеристики (рис. 2) в диапазоне относительной долговечности, до зарождения макротрещины, $0,9N_p$ (N_p – число циклов разрушения) свидетельствует о снижении интенсивности механизма упрочнения конструкционного материала. Разрушение материала происходит на уровне 20% снижения относительного значения упрочнения в результате исчерпания способности материала к пластическому деформированию на всех структурных уровнях материала.

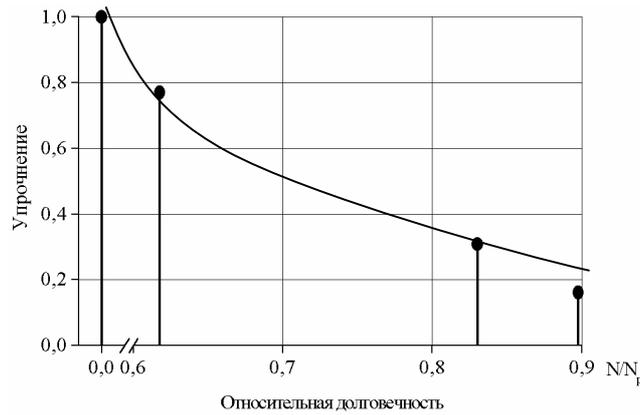


Рис. 2. Характеристика упрочнения сплава ПТ5В.

Последовательность чередования максимумов и минимумов (рис. 1) можно описать с помощью рекуррентного ряда.

$$N_i / N_{i+1} = \Delta^{1/n}$$

где N_i – число циклов предыдущего экстремума, N_{i+1} – число циклов последующего экстремума, Δ – постоянная универсальная разрушения, $n = 1, 2, 4, 8, \dots$. Для титановых сплавов, при комнатной температуре, среднее значение $\Delta \approx 0,12$.

В соответствии с теорией предложенной в работе [9] универсальная постоянная разрушения характеризует энергетическое состояние локальных объемов конструкционного материала по аналогии с процессом плавления. При накоплении критической энергии упругого деформирования локального объема поликристаллического материала, происходит скачкообразное изменение его физико-механических свойств, что косвенно можно контролировать по изменению определенного характеристического параметра.

Выводы: 1. Характеристика упрочнения конструкционного материала соответствует кинетике повреждаемости и позволяет контролировать его предельное состояние.

2. Распределение локальной неупругости позволяет контролировать эволюцию механических свойств титанового сплава ПТ5В в соответствии с дискретной моделью повреждаемости.

3. Результаты сопоставления расчетного ряда экстремумов упрочнения с экспериментальным находится в пределах 10% погрешности.

Summary

The obtained characteristic of local inelasticity allows controlling the kinetics of damageability in the PT5V titanium alloy, which is implicitly expressed via its statistical characteristics of distribution along the surface of the specimen made of the

material studied. The limiting state of the structural material can be determined from its hardening response as a reduction in the hardening rate to its limiting value.

Keywords: inelasticity, damageability, microplastic deformation, cyclic deformation.

Резюме

Отримано характеристику локальної непружності, яка дозволяє контролювати кінетику пошкоджуваності титанового сплаву ПТ5В і непрямо виражена через її статистичні характеристики розподілу на поверхні зразка досліджуваного матеріалу. Граничний стан конструкційного матеріалу може бути визначено з характеристики зміцнення, як зменшення інтенсивності зміцнення до граничного значення.

Ключові слова: непружність, пошкоджуваність, мікропластична деформація, циклічне деформування.

1. Яковлева Т. Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – К.: Наук. думка, 2003. – 238 с.
2. Иванова В. С. Междисциплинарный анализ диссипативного состояния физико-химических систем при их эволюции // МиТОМ. – 2006. – № 9. – С. 12 – 19.
3. Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.
4. Троценко В. Т. Циклические деформации и усталость металлов. Том 1. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
5. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 232 с.
6. Радченко А. И., Кабесас А. Исследование дискретных явлений при усталости металлов путем статистических измерений микротвердости // Изв. РАН. – Металлы. – 2000. – № 5. – С. 92 – 100.
7. Писаренко Г. Г., Майло А. Н., Войналович А. В. Дискретные явления неупругости при усталости металлических материалов: Тр. II Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, 2007. – С. 38 – 40.
8. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Голованьов Ю. М., Всинюк І. М. Пошкоджуваність та структурна неоднорідність титанового сплаву VT14 при циклічному навантажуванні // Пробл. прочности. – 2003. – № 6. – С. 75 – 84.
9. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

Поступила 23.05.2009