

Кочерова Е.Е., Злобин А.С., Сазанов В.В., Медведев С.А.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛИ

Общепринятый взгляд на процессы повреждения материала детали циклическим нагружением базируется на типичном для пластичных металлических конструкционных материалов виде кривой сопротивления усталости в малоцикловой (МЦУ), переходной и многоцикловой (МнЦУ) зонах. В качестве примеров на рис. 1, 2 показаны полученные при циклическом растяжении стандартных образцов обобщённые кривые сопротивления усталости в диапазоне долговечностей  $10-10^8$  циклов для жаропрочного титанового сплава ВТ9 и жаропрочного никелевого сплава ЭП742ИД.

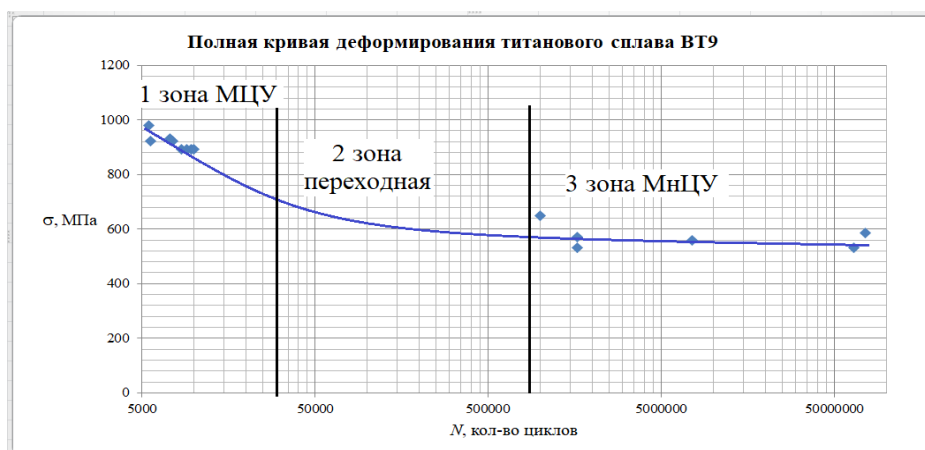


Рис. 1. Сопротивление усталости титанового сплава ВТ9

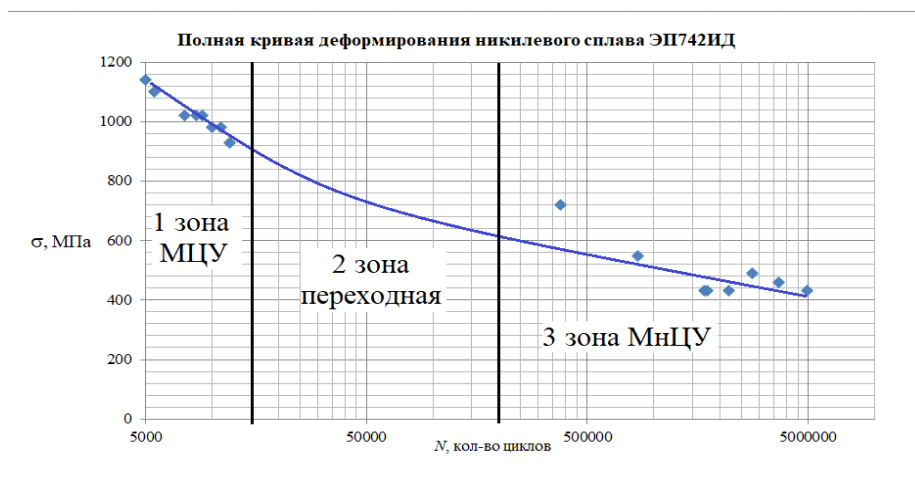


Рис. 2. Сопротивление усталости никелевого сплава ЭП742ИД

Такие характеристики сопротивления усталости, полученные для конструкционных материалов на базе простейших макроэкспериментов как на стандартных, так и нестандартных образцах для различных видов напряжённо-деформированного состояния и проводившиеся металлургические исследования образцов на разной стадии повреждения, определили, как действующие физические механизмы усталостного повреждения материалов деталей, так и общепринятые подходы к расчётным оценкам сопротивления усталости реальных конструкций [1].

С точки зрения описания физических механизмов усталостного повреждения материала они в любом случае содержат в себе необратимые процессы:

- микромеханизм 1, связанный с количеством, подвижностью и взаимодействием дефектов кристаллической решётки материала детали – дислокаций, как внутри кристаллитов, так и на их границах, работающий в области упругого поведения материала и определяющий повреждение по механизму многоциклового усталости (зона 3 обобщённой кривой сопротивления усталости на рис. 1,2);
- мезомеханизм 2, связанный с необратимыми пластическими деформациями в первом цикле нагружения и циклическими макродеформациями отдельных кристаллитов без заметного нарушения в целом упругого поведения материала при циклическом деформировании, определяющий совместно с микромеханизмом 1 усталостное повреждение в переходной зоне (зона 2 обобщённой кривой сопротивления усталости на рис. 1,2);
- макромеханизм, связанный с циклической макропластической деформацией материала детали, определяющий повреждение по механизму малоциклового усталости (зона 1 обобщённой кривой сопротивления усталости на рис. 1,2) [2].

Следует отметить, что работа всех этих механизмов существенно зависит от исходного состояния материала, унаследованного от этапа производства.

Традиционное использование в расчётах на прочность и долговечность деталей машин силовых критериев (напряжений) и полученного на специальных стандартных образцах экспериментального материала в сочетании с набором экспериментально же определённых эмпирических поправок успешно работает в зоне многоциклового усталости и, в принципе, позволяет с определённой степенью достоверности выполнить расчётные оценки прочности и долговечности высоконагруженных деталей машин в переходной зоне и зоне малоциклового усталости. Но при этом:

- необходимый набор экспериментальных данных на образцах из реальных деталей или заготовок в необходимом количестве для статистической обработки по опыту накапливается в лучшем случае к этапу сертификации или государственных испытаний изделия, а достоверные ресурсные оценки должны быть обеспечены на стадии эскизного или, в крайнем случае, технического проекта;
- необходимо проведение большого объёма циклических испытаний натуральных деталей, причём в ряде случаев с имитацией температурных условий.

В зависимости от используемых критериев (силовых, деформационных, деформационно-энергетических) оценки предельного состояния могут быть сформированы методические подходы к учёту исходного, унаследованного от производства, состояния материала детали на стадии её усталостного повреждения в эксплуатации.

При использовании силовых и деформационных критериев традиционно и в ряде случаев вполне обоснованно используется эмпирический учёт технологической наследственности средствами её имитации при макроэкспериментах для получения данных о предельном состоянии материала на образцах или испытаниями натуральных деталей [3].

Эти варианты либо достаточно проблемны с точки зрения обоснованности для реальной конструкции (при использовании экспериментов с образцами), либо при обоснованности – весьма затратны, так как при испытаниях натуральных деталей необходимо достаточное для статистического анализа количество испытаний. Их использование на стадии проектирования, как правило, сопряжено с отсутствием достаточного, а зачастую и вообще какого-либо экспериментального материала.

Именно поэтому весьма актуальна для проектировщика задача отработки расчётно-аналитических методов анализа с использованием по возможности минимального объёма экспериментального материала.

Наиболее обоснованно с точки зрения учёта технологической наследственности в области малоциклового усталости выглядит использование деформационно-энергетического критерия повреждения материала, основанного на расчёте удельной диссипации энергии деформирования материала, связанной с его пластической деформацией, в том числе – циклической (рис. 3).

Из рис. 3 условие возникновения трещины при МЦУ имеет вид:

$$W_{кр} = W_{техн} + W_{нагр} + N \cdot W_{ц} ,$$

где  $W_{кр}$  – критическая величина удельной диссипации энергии деформирования, при израсходовании которой образуется трещина;  $W_{техн}$  – энергия, израсходованная в процессе изготовления, формирования поверхностного слоя детали;  $W_{нагр}$  – энергия, израсходованная при первом нагружении конструкции;  $N$  – количество циклов нагружения до разрушения;  $W_{ц}$  – энергия, расходуемая в каждом последующем цикле нагружения.

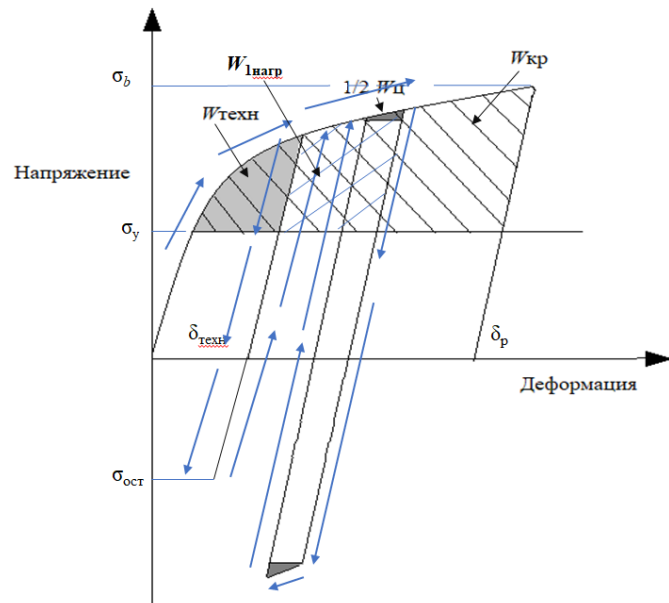


Рис. 3. Процессы деформирования материала критической точки поверхности в течение жизненного цикла детали

Основанием для такого утверждения, кроме универсальности и физической обоснованности такого подхода, является использование скалярной величины – энергии в отличие от использования характеристик, связанных с напряжениями и деформациями, имеющих тензорную сущность.

### Библиографический список

1. Авербах, Б.Л. Некоторые физические аспекты разрушения [Текст] / Б.Л. Авербах // Разрушение. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. М.: Мир, 1973. – 1. – 605 с.
2. Ануров, Ю.М. Основы обеспечения прочностной надёжности авиационных двигателей и силовых установок [Текст] / Ю.М. Ануров, Д.Г. Федорченко. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.