

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Общепринятый взгляд на процессы повреждения материала детали циклическим нагружением базируется на типичном для пластичных металлических конструкционных материалов виде кривой сопротивления усталости. В качестве примеров на рис. 1 и 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).

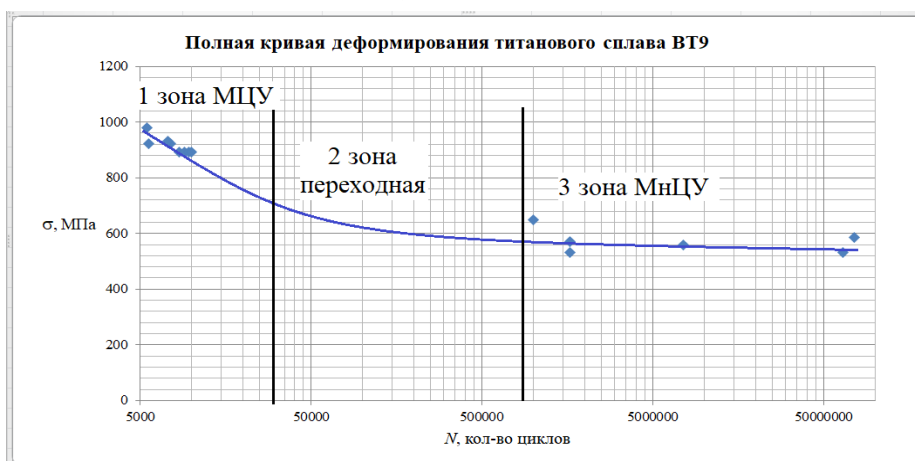


Рис. 1. Сопротивление усталости титанового сплава ВТ9

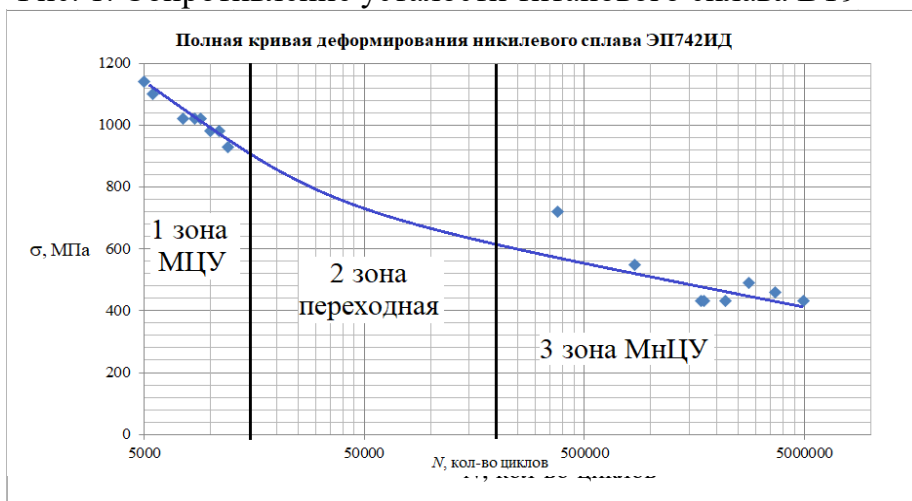


Рис. 2. Сопротивление усталости никелевого сплава ЭП742ИД

Такие характеристики сопротивления усталости, полученные для конструкционных материалов на базе простейших макроэкспериментов как на стандартных, так и нестандартных образцах для различных видов НДС, и проводившиеся металлургические исследования образцов на разной стадии повреждения опреде-

лили, 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 в целом упругого поведения материала и определяющий повреждение по механизму многоциклового усталости (зона 3 обобщённой кривой сопротивления усталости (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 (рис. 1,2));

– макромеханизм, связанный с циклической макропластической деформацией материала детали, определяющий повреждение по механизму малоциклового усталости (зона 1 обобщённой кривой сопротивления усталости (рис. 1, 2)) [2].

Следует отметить, что работа всех этих механизмов существенно зависит от исходного состояния поверхности материала, технологической наследственности, в том числе остаточных напряжений, полученных на этапе производства. Традиционное использование в расчётах на прочность и долговечность деталей машин напряжений (силовые критерии) и полученного на специальных стандартных образцах экспериментального материала в сочетании с набором экспериментально же определённых эмпирических поправок успешно работает в зоне многоциклового усталости и позволяет с определённой степенью доверия 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 остаточных напряжений, полученных в процессе производства, а также их влияние на состояние материала детали на стадии её усталостного повреждения в эксплуатации.

При использовании силовых и деформационных критериев обычно используется эмпирический учёт технологической наследственности средствами её имитации при макроэкспериментах по получению данных по предельному состоянию 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.

Использование образцов-свидетелей, подготовленных по нескольким различным технологиям, исследование полученного поверхностного слоя [4], а также определение картины распределения остаточных напряжений позволяет существенно сократить расходы и время на выбор оптимальной технологии изготовления типовых деталей, работающих при различных условиях нагружения, а также сократить количество испытаний на этапе проектирования детали. Моделирование остаточных напряжений в поверхностном и в подповерхностном слоях материала в процессе моделирования типовых испытаний, в расчётных комплексах типа ANSYS, а также использование полученных параметров в дальнейших расчётах деталей и узлов дают достаточно высокую достоверность для оценки влияния остаточных напряжений на циклическую долговечность.

Наиболее обоснованно с точки зрения учёта влияния остаточных напряжений (полученных в процессе обработки), 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).

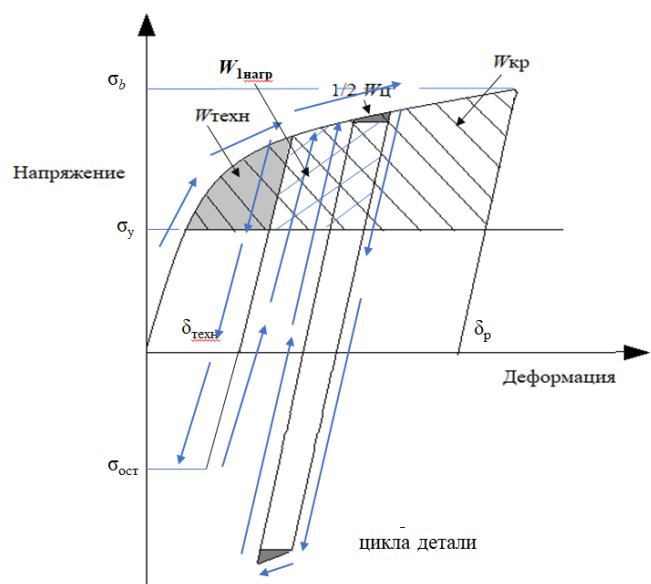


Рис. 3. Процессы деформирования материала критической точки поверхности в течение жизненного цикла детали

Из рис. 3 условие возникновения трещины при МЦУ:

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

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 (учёт $\sigma_{ост}$ – остаточных напряжений); $W_{нагр}$ – энергия, израсходованная при первом нагружении конструкции; N – количество циклов нагружения до разрушения; $W_{ц}$ – энергия, расходуемая в каждом последующем цикле нагружения.

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 / 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 / Ю.М. Ануров, Д.Г. Федорченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
4. Иванов, С.И. Определение остаточных напряжений в пластинках методом полосок / С.И. Иванов. – Куйбышев: Труды КуАИ, 1971. – Вып. 48. – 226 с.