

**Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.П., Каранаева О.В., Попков А.А.**

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ  
ПО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
С КОНЦЕТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Вначале отметим, что при экспериментальном определении предела выносливости использовалась стандартная методика испытаний на усталость «вверх-вниз» [1] с той лишь разницей, что критерием смены знака приращения являлось не разрушение образца, а наличие у выстоявшего базу испытаний образца нераспространяющейся трещины усталости. Нераспространяющаяся трещина усталости определялась простым, но надёжным способом: все образцы исследуемого материала, выстоявшие базу испытаний, в дальнейшем подвергались статическому разрушению при растяжении.

Эта методика имеет недостатки (в частности, искажения, вызванные пластической деформацией при разрушении растяжением), но для случая нераспространяющихся трещин усталости она даёт достаточно точный результат в связи с малой глубиной и малой степенью раскрытия, не позволяющими точно определить появление трещины при других методах.

Перейдём теперь к теоретическому рассмотрению данной задачи. Выявленные в работе [2] закономерности, в частности, наличие экстремума критерия остаточных напряжений при нагрузке, соответствующей пределу выносливости по разрушению, можно рассматривать не только со стороны механики остаточных напряжений, но и со стороны энергетических критериев. В этом смысле остаточные напряжения необходимо воспринимать как некоторую удельную энергию деформации, накопленную в поверхностном слое образца в результате тех или иных внешних воздействий.

Рассматривая с этих позиций, критерий остаточных напряжений из работы [2] можно трактовать как некоторую среднюю за полный цикл нагружения удельную энергию деформации, накопленную в поверхностном слое. Следовательно, основную закономерность, выявленную в работе [2], можно рассматривать в следующем виде: при циклическом нагружении в области многоциклового усталости наблюдается экстремум средней за полный цикл нагружения удельной энергии, поглощённой поверхностным слоем детали, толщина которого равна глубине нераспространяющейся трещины усталости, при нагрузке, соответствующей пределу выносливости по разрушению. Этот подход к выявлению закономерности имеет логическую связь с известными

исследованиями института металловедения АН России [3], по результатам которых были разработаны методы ускоренного определения предела выносливости на основе энергетических критериев усталости.

Рассматривая в этом направлении основную закономерность работы [2], можно предположить правильность разработанного принципа определения предела выносливости по разрушению при прогнозировании аналогичной характеристики по трещинообразованию. Отличие следует искать в выборе энергетического критерия. В качестве критерия для случая предела выносливости по разрушению в работе [2] был выбран интегральный критерий влияния остаточных напряжений, учитывающий распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, равной глубине нераспространяющейся трещины усталости. Была выдвинута гипотеза, что в качестве критерия, в случае предела выносливости по трещинообразованию, следует выбрать величину остаточных напряжений [4]  $\bar{\sigma}_{\alpha_{\sigma}}^+$  на поверхности детали, в частности, на дне надреза. На основании выдвинутой гипотезы и с использованием математической модели работы [2] были проведены расчёты выбранного критерия для различных вариантов сочетаний материал - типоразмер, надрезы – тип деформации.

В частности, для образцов с надрезами V-образного профиля с различными теоретическими коэффициентами концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma}$ , представленных в работе [2] при циклическом растяжении-сжатии, результаты приведены на рисунке 1 в зависимости от коэффициента перегрузки  $k_1$ , вычисляемого по формуле

$$k_1 = \frac{\sigma}{\sigma_{-1p}^+}$$

где  $\sigma$  – амплитуда напряжений от внешней нагрузки,  $\sigma_{-1p}^+$  – предел выносливости по трещинообразованию.

Из рисунка 1 видно, что для всех рассматриваемых материалов (стали 45, 30ХГСА, 38Х2МЮА) при разной степени концентрации напряжений наблюдается экстремально наибольшее по модулю значение критерия сжимающих остаточных напряжений или средней удельной энергии деформации.

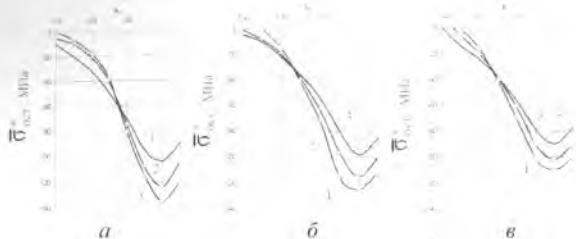


Рисунок 1 – Критерий остаточных напряжений  $\sigma_{\phi_{khT}}^*$  при циклическом растяжении-сжатии образцов из стали 45 (а), 30X17СА (б) и 38X2MЮА (в) с надрезами V-образного профиля: 1 –  $\alpha_{\sigma}=1,62$ ; 2 –  $\alpha_{\tau}=2,77$ ; 3 –  $\alpha_{\sigma}=3,76$

Расчёты критерия остаточных напряжений  $\sigma_{\phi_{khT}}^*$  для других сочетаний материалов,

степени концентрации, вида деформации подтвердили выявленную закономерность.

Основываясь на этой закономерности, была разработана методика прогнозирования предела выносливости по трещинообразованию, которая заключается в следующем:

- изготавливаются электрополированные цилиндрические гладкие образцы, которые подвергаются статическим испытаниям с целью определения макроскопических характеристик используемого материала (предел текучести на растяжение и сжатие);
- изготавливаются электрополированные цилиндрические образцы с надрезами V-образного профиля. С использованием этих образцов и расчётно-экспериментальной методики определяются величина и распределение пределов текучести на растяжение и сжатие ослабленного поверхностного слоя;
- с использованием математической модели формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, первоначально свободных от них, представленной в работе [2], проводятся расчёты критерия сжимающих остаточных напряжений – величина остаточных напряжений на поверхности наименьшего сечения детали – при различных величинах амплитуд внешней нагрузки;
- на основании найденных величин критерия остаточных напряжений определяется нагрузка, которой соответствует экстремальное значение критерия. Величина амплитуды внешней нагрузки равна пределу выносливости детали по трещинообразованию.

С использованием данной методики были проведены расчёты пределов выносливости по трещинообразованию для образцов, изготовленных из используемых материалов, типоразмеров, концентраторов напряжений. Результаты расчётов для случая циклического растяжения-сжатия приведены в таблице 1. Видно, что прогнозируемая величина пределов выносливости  $\sigma_{-1}^*$  незначительно отличается от экспериментально

найденной, что доказывает достоверность методики и адекватность предложенной модели процессам, происходящим в поверхностном слое при циклическом нагружении.

Таблица 1 – Значения предела выносливости по трещинообразованию (МПа): а – эксперимент, б – модель

Материал	Вариант надреза					
	1		2		3	
	$\alpha_\sigma$					
	1,62		2,77		3,76	
	а	б	а	б	а	б
сталь 45	183	179	108	105	81	78
30ХГСА	203	200	121	119	89	87
38Х2МЮА	270	269	162	160	121	120

Из таблицы 1 следует, что отличие пределов выносливости по разрушению и по трещинообразованию колеблется от 6% до 12% для разных материалов и степеней концентрации напряжений, причём, чем более пластичный материал, тем больше отличие рассматриваемых характеристик. Данная тенденция увеличения различия наблюдается и с повышением степени концентрации напряжений для одного и того же материала. Эти закономерности характерны как для случая циклического растяжения-сжатия, так и для чистого изгиба с вращением. Причём, как показали исследования при одинаковых типоразмерах надрезов в случае циклического растяжения-сжатия различие между  $\sigma_{+1p}^*$  и  $\sigma_{-1p}^*$  больше, чем между  $\sigma_{+1}^*$  и  $\sigma_{-1}^*$  в случае чистого изгиба с вращением. Этот эффект связан с соответствующим снижением степени концентрации напряжений надрезов при переходе от растяжения-сжатия к изгибу.

#### Библиографический список

1. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник [Текст] / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232с.
2. Бордаков, С.А. Использование принципов механики остаточных напряжений в прогнозировании предела выносливости цилиндрических деталей [Текст] / С.А. Бордаков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1998. – №1. – С. 73-80.
3. Иванова, В.С. Природа усталости металлов [Текст] / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
4. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.