

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СМЕШАННЫХ МОДАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ

В.В.Покровский, В.Г.Сидяченко, В.Н.Ежов

Институт проблем прочности имени Г.С.Писаренко НАН Украины, Украина

An experimental technique has been developed to study the effect of mixed I + II + III loading modes on the crack resistance characteristics of steels, including taking into account preliminary thermomechanical loading. As a result of a comprehensive experimental study, diagrams of the ultimate state of a sample with a crack were constructed with mixed fracture modes, which were used to analyze the effect of preliminary thermomechanical loading on the characteristics of crack resistance.

Развитие трещин в реальных конструкциях происходит в условиях сложного напряженного состояния, что необходимо учитывать при расчете количества циклов нагружения при росте трещины от начального размера до критического. При этом берега трещины перемещаются в разных направлениях, что вызывает разрушение по смешанным модам, которое необходимо описывать соответствующими параметрами механики разрушения.

Случаи такого разрушения проиллюстрированы в работах [1,2]. Это усталостный рост трещины в сельхозмашине, разрушение железнодорожного колеса рис.1, опорные валки прокатных станов.

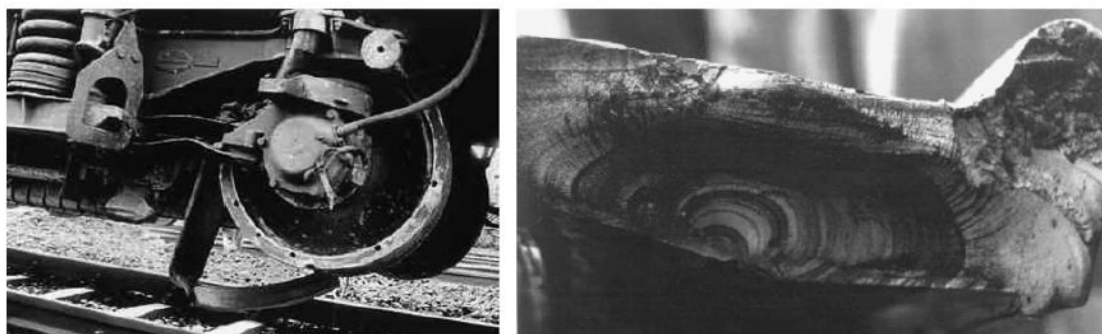


Рис.1. Разрушение железнодорожного колеса [1]

Применительно к атомной энергетике, если представить схематизированную модель оборудования реакторной установки ВВЭР-1000, то можно заметить, что все оборудование соединено сложной в геометрическом плане системой трубопроводов. С учетом того, что при эксплуатации атомной установки вследствие различных переходных режимов материал трубопроводов, места соединения трубопроводов с элементами установки подвергаются комбинированной системе нагрузок: поперечной силе, изгибающим моментам и т.д. Кроме того, в стенке трубопроводов под воздействием внутреннего давления на элементарный объем материала стенки действует двухосное нагружение. В случае инициирования трещины в материале трубопроводов, в стенке корпуса реактора её плоскость может иметь различную ориентацию по отношению к приложенной нагрузке. При этом происходит нагружение её берегов при смешанных модах деформирования.

На рис.2 показаны примеры системы трещин выявленных в наплавке в районе активной зоны корпуса реактора ВВЭР-1000 Калининской и Балаковской АЭС. Из приведенных данных видно, что вследствие произвольной ориентации плоскости

трещины деформация её берегов может происходить по смешанным модам нагружения.

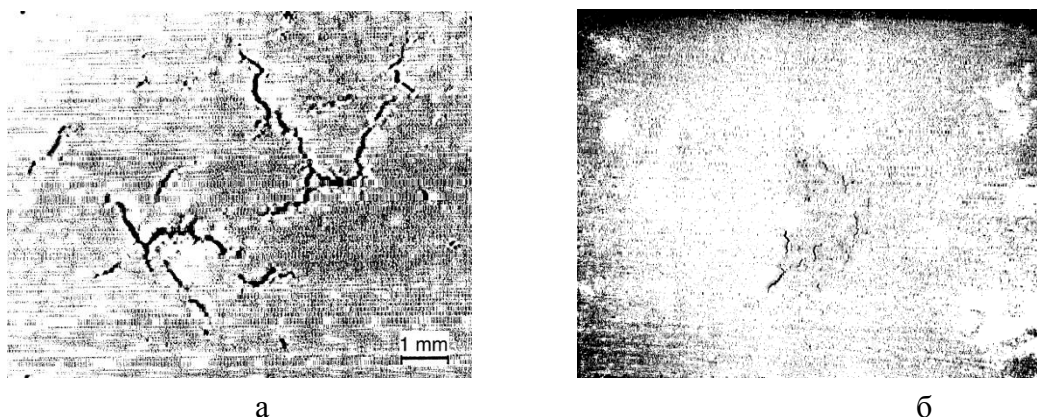


Рис.2. Сеть трещин в наплавке в корпусе реактора ВВЭР-1000: Калининская АЭС 1996 г. (а), Балаковская АЭС 1998 г (б) [3]

В настоящее время в Украине оценка хрупкой прочности материалов корпусов реакторов ВВЕР осуществляется на основе, сравнения расчетных значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для постулируемого в стенке корпуса дефекта с его критическим значением, определенным экспериментально. При этом в расчет ведется для трещин нормального отрыва. Кроме того, в ряде нормативных документов по оценке хрупкой прочности корпуса реактора рекомендуется учитывать увеличение вязкости разрушения на нижнем шельфе температурной зависимости в результате тепловой опрессовки (предварительное термомеханическое нагружение (ПТН)), которая может иметь место при аварийном охлаждении активной зоны реактора. Учитывая приведенный выше анализ, цель работы заключалась в расчетно-экспериментальном изучении трещиностойкости при смешанных модах деформирования и исследовании влияния предварительного термомеханического нагружения на характеристики трещиностойкости.

При исследовании всевозможных комбинаций смешанных мод нагружения использовали образец прямоугольного сечения с боковой трещиной при растяжении, поперечном и продольном нагружении (рис.3). Преимуществом данного образца является возможность зарождения первичной усталостной трещины по моде I ($l/W=0,5$), а затем исследование характеристик трещиностойкости при различных соотношениях мод. Также на (рис.3, с) представлена схема нагружения образца для реализации смешанности мод.

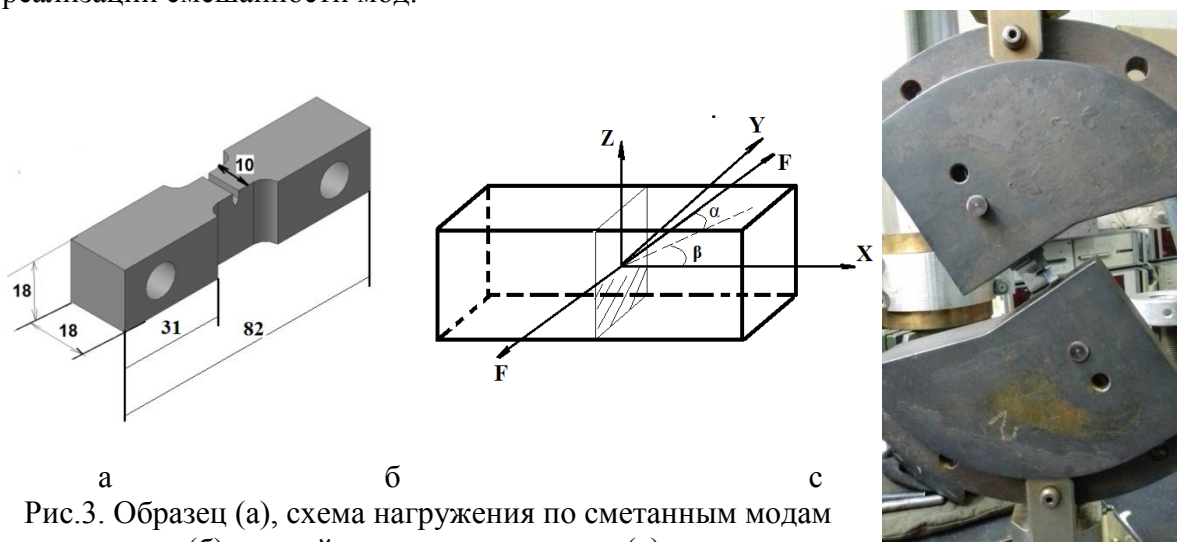
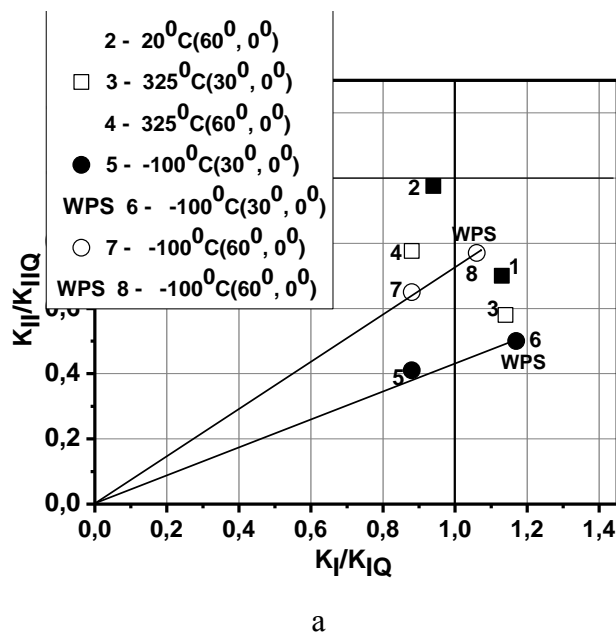


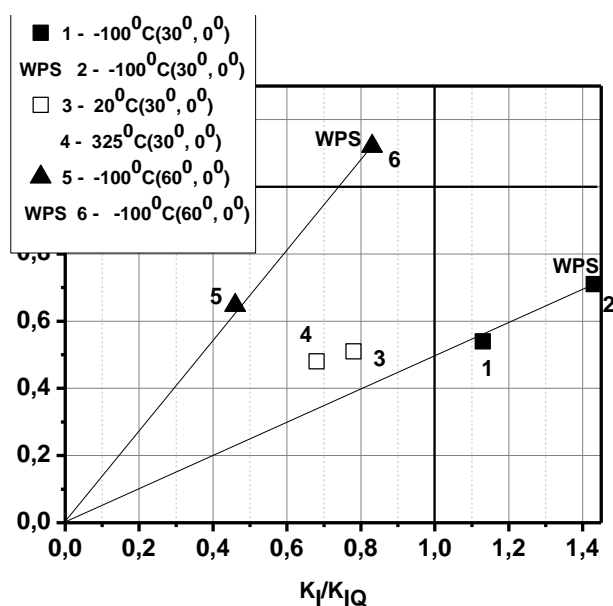
Рис.3. Образец (а), схема нагружения по смешанным модам (б), устройство для нагружения (с).

При изменении углов α , β между осевой нагрузкой и нормалью к плоскости трещины (рис.3, б) можно реализовать различные комбинации смешанных мод нагружения, а КИН рассчитываются на основании [3].

На рис.4 (а, б) показаны диаграммы предельных состояний, полученные при температурах $+20^{\circ}\text{C}$, $+325^{\circ}\text{C}$, -100°C в результате исследования трещиностойкости при смешанных I-II модах в том числе с учетом тепловой опрессовки (WPS). В круглых скобках на рисунках указаны значения углов α , β соответственно.



а



б

Рис.4. Диаграммы предельных состояний сталей при модах I-II: 15X2MFA(II) (а); 10ГН2МФА (б).

В исследуемых малых образцах сечением 10x18 мм при смешанных модах нагружения тепловая опрессовка осуществлялась по схеме с полной разгрузкой. В начале образец нагревался выше температуры хрупко-вязкого перехода (до $+325^{\circ}\text{C}$), затем нагружался до $0,8...0,9 Ke$ – разгружался и охлаждался, где Ke эквивалентное значение КИН при смешанных модах нагружения [4]. После этого, образцы охлаждали

до температуры – 100⁰С и разрушали при том же соотношении мод. Сравнение результатов расчетов K_e , показали увеличение K_e после ПТН (табл.1)

$$K_e = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2 + 4(\alpha_2 K_{III})^2},$$

$$\alpha_1 = K_{IC} / K_{IIIc} \quad \alpha_2 = K_{IC} / K_{IIIc} . \quad (1)$$

Табл.1. Результаты сравнительных расчетов K_e при смешанных I+II+III модах разрушения после ПТН и без.

Материал	α	β	K_e^{III}	K_e	K_e^{III} / K_e
10ГН2МФА	30	0	132	121,9	1,083
	60	0	95,1	73,45	1,24
	30	30	142,95	128,6	1,111
	60	60	97,67	97,5	1.002
15Х2МФА	30	0	76,76	61,6	1,25
	60	0	92,25	74,2	1,24
	30	30	71,9	53,47	1,34
	60	60	89,4	65,1	1,37

Выводы. Исследовано сопротивление разрушению реакторных сталей при статическом нагружении при различном соотношении мод деформирования – I+II, I+III, I+II+III. Отмечено положительное влияние предварительного термомеханического нагружения при всех комбинациях мод нагружения. Однако присутствие составляющих по K_{II} , K_{III} при создании ПТН уменьшает эффективность предварительного нагружения.

Литература

1. Richard H.A., Sander M., Fulland M., Kullmer G. Development of fatigue crack growth in real structures // Eng. Fract. Mech. – 2008. – 75. – P.331-340.
2. Іваницький Я. Л. Методи оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів за умов складного навантаження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 01.02.04. «Механіка деформівного твердого тіла» / Я.Л. Іваницький. – Львів, 2005. – 41 с.
3. Pokrovsky V. Problems of accuracy of radiation life calculation for WWER-1000 reactor pressure vessels // ARW NATO “Scientific fundamentals for the lifetime extension of reactor pressure vessels”, Kyiv, 2002.
4. Richard H.A., Eberlein A., Kullmer G. Concepts and experimental results for stable and unstable crack growth under 3D-mixed-mode-loadings // Eng. Fract. Mech.- 2017. - 174. – P. 10-20.