

Предельное состояние конструкционных сплавов для сверхпроводящей электромагнитной системы термоядерного реактора

Л. С. Новогрудский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

На основании анализа условий эксплуатации высоконагруженных конструктивных элементов сверхпроводящей электромагнитной системы термоядерного реактора и особенностей деформирования и разрушения сплавов при воздействии импульсов электрического тока и криогенных температур установлены критерии оценки предельного состояния материалов и сформулированы основные положения методики их определения.

Ключевые слова: предельное состояние, электрический ток, криогенные температуры.

Известно, что наиболее перспективным способом получения электрической энергии является управляемый термоядерный синтез [1]. Основная проблема реализации процесса термоядерного синтеза – удержание плазмы. Для ее решения предпринимались попытки использовать различные устройства, однако единственной реальной системой, на которой реализуется время, необходимое для запуска реакции, является замкнутая система тороидального типа – токамак. В настоящее время существует достаточно большое количество подобных установок, но ни на одной из них не удалось достигнуть параметров, необходимых для получения рентабельной энергии. Перспективным в этом отношении считается разрабатываемый в рамках международных проектов термоядерный реактор со сверхпроводящей электромагнитной системой.

На несущие элементы сверхпроводящей электромагнитной системы термоядерного реактора действуют стационарные и циклические температурные, механические и электромагнитные нагрузки. По предварительным расчетам [2, 3] компоненты сил, действующих на блок сверхпроводящей обмотки тороидального поля, достигают следующих значений: $F_x \cong 420$ МН – центробежная; $F_z \cong 200$ МН – нормальная к плоскости. В плоскости блока действует также циклический опрокидывающий момент $M = 260$ МН·м. При таких нагрузках расчетные значения эквивалентных статических напряжений в стальном корпусе достигают 740 МПа, а эквивалентных циклических – 450 МПа.

Представленные данные свидетельствуют о том, что для создания сверхпроводящих электромагнитных систем необходимо использовать конструкционные материалы с очень высоким уровнем механических свойств.

Задача выбора конструкционных материалов для высоконагруженных элементов рассматриваемых систем осложняется еще одним существенным обстоятельством. Используемые металлические материалы должны обладать слабой чувствительностью к пластифицирующему воздействию электрического тока, поскольку в случае внезапного срыва плазмы плотность импульса

электрического тока, наведенного в конструктивных элементах сверхпроводящей магнитной системы, может достигать $3 \cdot 10^2$ МА/м². Как известно [4], прохождение электрического тока через нагруженный металл вызывает пластическое течение последнего, причем в интервале криогенных температур появление остаточной деформации может отмечаться при напряжениях, меньших предела текучести материала при соответствующей температуре. Физические предпосылки такого макронетермического влияния электрического тока достаточно полно описаны в [5].

Как правило, для криогенных устройств со сверхпроводящими электромагнитными системами появление остаточных деформаций недопустимо. В тороидальной камере термоядерного реактора остаточные деформации могут вызвать нарушение конфигурации полусинусоидального и тороидального полей, удерживающих плазму, что создаст чрезвычайную ситуацию. Из вышеизложенного следует, что показателем наступления предельного состояния таких конструкций и их элементов служит напряжение, при котором отмечается появление остаточных деформаций – напряжение начала пластического течения материала, в общем случае это предел текучести материала, физический либо условный. Однако, как было указано выше, при протекании электрического тока напряжение начала пластического течения материала в условиях криогенных температур существенно уменьшается. При этом условие наступления предельного состояния можно записать как

$$\sigma_{\text{ток}}^0 / \sigma_{\text{экв}} = 1,$$

где $\sigma_{\text{ток}}^0$ – напряжение начала пластического течения, инициируемое электрическим током; $\sigma_{\text{экв}}$ – расчетное эквивалентное напряжение наиболее нагруженной зоны конструкции.

Для определения напряжения $\sigma_{\text{ток}}^0$, фактически являющегося критериальной характеристикой предельного состояния материала при воздействии электрического тока и температурах, близких к абсолютному нулю, предлагается соотношение вида [6]

$$\sigma_{\text{ток}}^0 = \sqrt{2E \left(\int_0^{2 \cdot 10^{-3}} \sigma d\epsilon - \frac{\lambda}{2V} I^2 Rt \right)}, \quad (1)$$

где I – сила электрического тока (амплитуда силы импульса электрического тока полусинусоидальной формы); t – время воздействия электрического тока; V – объем образца; λ – коэффициент, характеризующий способность материала сопротивляться действию электрического тока и определяемый экспериментально; E – модуль упругости.

Значение напряжения начала пластического течения $\sigma_{\text{ток}}^0$, по аналогии с условным пределом текучести, выбрано соответствующим напряжению, при котором протекание электрического тока вызывает появление остаточной деформации, равной 0,2% начальной расчетной длины образца.

В таблице представлены экспериментальные значения $\sigma_{\text{ток}}^0$ и вычисленные с помощью соотношения (1) для сталей, используемых в криогенной технике, при прохождении полусинусоидального импульса электрического тока (длительность 10^{-2} с, амплитуда 3,2 кА) в условиях температуры жидкого гелия. Как следует из приведенных результатов, данный подход позволяет достаточно точно (разница между экспериментальными и вычисленными значениями не превышает 5,0%) определить напряжение начала пластического течения, инициированного электрическим током.

Значения напряжений начала пластического течения сталей при температуре 4,2 К и воздействии импульсов электрического тока

Сталь	Состояние исследуемого материала	$\sigma_{\text{ток}}^0$, МПа	
		Расчет	Эксперимент
03X20H16AG6	Исходное	867	875
	Отжиг	951	985
12X18H10T	Исходное	516	525
	Отжиг	583	605
0H9	Исходное	792	775

Рассматриваемый подход является достаточно универсальным. С его использованием получены удовлетворительные результаты не только для сталей различных классов (03X20H16AG6 – стабильноаустенитная в интервале температур 293...4,2 К; 12X18H10T – метастабильная; 0H9 – ферритная), но и для таких титановых сплавов, как ПТЗВ, ВТ1-0 и 19.

Трещиностойкость материала связана с его способностью необратимо поглощать энергию в процессе разрушения. Поглощение энергии при разрушении происходит в окрестности вершины трещины. Величина энергии, поглощаемой материалом при разрушении, зависит от размера зоны пластической деформации, образующейся в вершине трещины до ее страгивания.

Радиус этой зоны определяется как $r = \frac{1}{k} \left(\frac{K_c}{\sigma_{0,2}} \right)^2$, где k – коэффициент,

зависящий от вида напряженного состояния в вершине трещины, $k \cong 6\pi$ – для плоской деформации, $k \cong 2\pi$ – для плоского напряженного состояния.

Для материала данной толщины при неизменных условиях нагружения критическое значение радиуса зоны пластической деформации $r^{\text{кр}}$, при котором происходит страгивание трещины, является постоянным [7]. Поскольку электрический ток лишь стимулирует пластическое течение и развитие пластической деформации, величину $r^{\text{кр}}$ можно рассматривать в качестве характеристики предельного состояния и в случае прохождения импульса электрического тока, что можно записать следующим образом:

$$r^{\text{кр}} = \frac{1}{k} \left(\frac{K_c}{\sigma_{0,2}} \right)^2 = \frac{1}{k} \left(\frac{K_c^{\text{ток}}}{\sigma_{\text{ток}}^{\text{кр}}} \right)^2, \quad (2)$$

где K_c – значение критического коэффициента интенсивности напряжений; $K_c^{\text{ТОК}}$ – его значение при воздействии электрического тока; $\sigma_{\text{ТОК}}^{\text{КР}}$ – напряжение, при котором на контуре зоны пластической деформации критического радиуса выполняется условие текучести. Значение $\sigma_{\text{ТОК}}^{\text{КР}}$ определяется с помощью соотношения (1) при замене пределов интегрирования $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$ ($\varepsilon_1 = r^{\text{КР}}/l_0$ – деформация, соответствующая $r^{\text{КР}}$).

Решая уравнение (2) относительно $K_c^{\text{ТОК}}$, получаем

$$K_c^{\text{ТОК}} = \sigma_{\text{ТОК}}^{\text{КР}} \sqrt{kr^{\text{КР}}}. \quad (3)$$

Таким образом, установив критическое значение радиуса пластической зоны в вершине трещины без воздействия электрического тока, значение критического коэффициента интенсивности напряжений K_c при его воздействии найдем по соотношению

$$K_c^{\text{ТОК}} = \sqrt{2Ekr^{\text{КР}} \left(\int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon - \frac{\lambda}{2\nu} I^2 Rt \right)}, \quad (4)$$

не выполняя сложные экспериментальные исследования по его определению.

В качестве примера вычислим значение $K_c^{\text{ТОК}}$ для стали 0Н9 при температуре 4,2 К, учитывая, что при данной температуре разрушение 0,5С(Т) образцов стали происходит в условиях плоской деформации. Используя выражения (1) и (2), получаем $\sigma_{\text{ТОК}}^{\text{КР}} = 1186$ МПа, $r^{\text{КР}} = 144 \cdot 10^{-3}$ м. С помощью уравнения (4) определим $K_c^{\text{ТОК}} = 55$ МПа $\sqrt{\text{м}}$. Экспериментальное значение $K_c^{\text{ТОК}}$ составило 57 МПа $\sqrt{\text{м}}$. Расхождение с расчетными данными K_c не превышает 4,0%.

Таким образом, представленные расчетные соотношения позволяют достаточно точно определять значения параметров, характеризующих предельное состояние конструкционных сплавов при воздействии импульсов электрического тока в условиях криогенных температур.

Резюме

На основі аналізу умов експлуатації високонавантажених конструктивних елементів надпровідної електромагнітної системи термоядерного реактора і особливостей деформування та руйнування сплавів при дії імпульсів електричного струму і криогенних температур встановлено критерії оцінки граничного стану матеріалів та сформульовано головні положення методики їх визначення.

1. Dransfeld K., Hajdu Y., Herlach F., et al. Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and Their Application. – Berlin; Heideberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1985. – 450 p.

2. *Алексеев А. Б., Арнеман А. Ф., Малков А. А. и др.* Проблемы прочности сверхпроводящей магнитной системы термоядерного реактора ИТЭР // Актуальные проблемы прочности материалов и конструкций при низких и криогенных температурах. – СПб.: СПбГАХИТ, 1997. – С. 31 – 35.
3. *Стрижало В. А., Спирченко Ю. В., Новогрудский Л. С. и др.* Прочность конструкционных материалов для сверхпроводящих магнитных систем / АН Украины. Ин-т пробл. прочности. – Препр. – Киев, 1990. – 21 с.
4. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 157 с.
5. *Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д.* Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 843 с.
6. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С.* Оценка предельного состояния конструкционных материалов для сверхпроводящей электромагнитной системы термоядерного реактора // Вопр. атом. науки и техники. – 1998. – Вып. 1 (67), вып. 2 (68). – С. 109 – 111.
7. *Херцберг Р. В.* Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.

Поступила 26. 05. 2003