

УДК 669.14.018.298

А.А. Петелина, В.А. Юханов

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

ДИФФУЗИОННО-КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 15Х2НМФА

Аннотация. В процессе эксплуатации на атомных электростанциях металлическое оборудование подвергается воздействию температур в интервале от 290 до 320 °С. Это может привести к развитию процессов термического старения и снижению сопротивления хрупкому разрушению. Дegradация свойств стали учитывается с помощью значения сдвига критической температуры хрупкости. Показано, что процесс термического старения стали контролируется диффузией углерода и связан с выделением карбидной фазы. Полученные данные позволили сделать прогноз свойств стали и величины сдвига критической температуры хрупкости на ресурс 60 лет.

Ключевые слова: термическое старение, ударная вязкость, диффузия, карбидообразование.

THE DIFFUSION-CONTROLLED THERMAL AGEING PROCESSES IN CONSTRUCTIONAL STEEL 15X2NMFA

Abstract. During the exploitation at nuclear power plants the metal details are exposed at the temperatures in the range of 290 – 320 °С. It can leads to development of thermal ageing processes and to decreasing the embrittlement resistance. The steel properties degradation is taking into account by introduction the value of critical embrittlement temperature shift. The thermal aging processes are controlled by diffusion of carbon and associated with separation of the carbide phase. The presented data secure the prognosis of steels properties and critical embrittlement temperature shift for 60 years resource.

Keywords: thermal aging, impact strength, diffusion, carbide particles.

Важнейшим элементом, определяющим надежность и долговечность атомных электростанций (АЭС), является корпусное оборудование АЭС, для изготовления которого используется сталь 15Х2НМФА.

В процессе эксплуатации оборудование из стали 15Х2НМФА подвергается воздействию повышенных температур (290 – 320 °С), что может привести к развитию процессов термического старения (ТС) и изменению уровня механических свойств, а также к снижению сопротивления хрупкому разрушению материала. Важнейшей характеристикой, используемой в расчетах на сопротивление хрупкому разрушению стали 15Х2НМФА, является критическая температура хрупкости (T_k) [1]. Дegradация свойств металла учитывается путем введения в расчет соответствующих сдвигов T_k (ΔT_T). К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных данных [2], указывающий на определенное влияние процессов ТС при температуре до 350 °С на сопротивление хрупкому разрушению корпусной стали 15Х2НМФА. Однако все предреакторные исследования процесса ТС проводились на базе длительности не более 10 тыс. ч.

Таким образом, цель настоящей работы состояла в уточнении имеющихся и получении новых кинетических кривых ΔT_T оборудования из стали 15Х2НМФА при ТС длительностью до 100 тыс. ч., дополнительных исследований по определению механизма термического старения и в разработке прогнозных оценок величин сдвигов ΔT_T и механических свойств корпусной стали при продлении срока эксплуатации до 60 лет.

Исследование кинетики ТС проводилось на металле промышленных плавок из стали 15Х2НМФА. Термическому старению при 250 – 375 °С подвергались тангенциальные заготовки из средней трети по толщине поковки. Ударную вязкость определяли на образцах по ГОСТ 9454. Серийные кривые ударной вязкости аппроксимировали зависимостью гиперболического тангенса, а ΔT_T определяли по сдвигам указанных зависимостей после ТС по отношению к исходной.

На рис. 1 представлена зависимость величины ΔT_T от времени тепловых испытаний при температурах 250, 300, 350 °С. Все полученные зависимости имеют почти одинаковый вид – восходящая ветвь при малых (относительно максимальной длительности при заданной

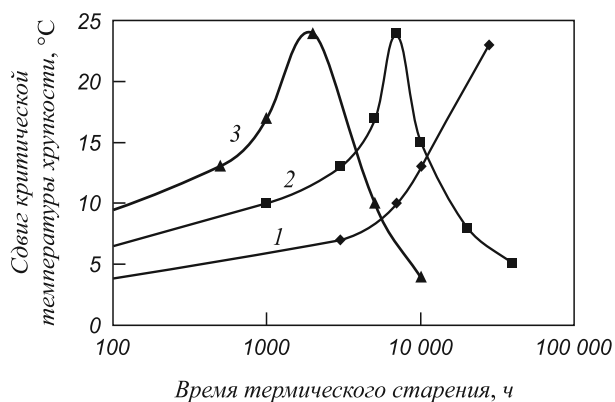


Рис. 1. Кинетика термического старения стали 15Х2НМФА при различных температурах, °С:
1 – 250; 2 – 300; 3 – 350

температуре) временах выдержек, максимум, соответствующий во всех случаях $\sim \Delta T_T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ и нисходящая ветвь при больших временах выдержек. Данные зависимости представляют собой самоподобные кривые, которые выражают собой один и тот же кинетический закон изменения механических свойств материала с учетом того факта, что темпы изменения свойств с увеличением температуры экспоненциально возрастают. Это позволяет сделать предположение, что механизмы, приводящие к изменению механических свойств, в процессе термического старения не меняются в рассматриваемом температурном интервале. Таким образом, полученный экспериментальный материал предоставляет для получения дополнительной информации следующие возможности:

– поскольку температурная зависимость процессов перестройки атомной структуры, связанная с миграцией атомов, процессами химических и фазовых превращений, приводящих к изменению свойств материала определяется уравнением Аррениуса, то можно, используя зависимости $\Delta T_T(\tau)$ при различных температурах, определить эффективную энергию активации θ ;

– величина эффективной энергии активации позволит сделать предположения о лимитирующем звене процесса изменения механических свойств, т.е. за счет какой стадии превращений в стали происходит сначала увеличение, а затем уменьшение ΔT_T ;

– используя энергию активации, можно будет сделать прогноз значения ΔT_T на ресурс 60 лет при максимальной рабочей температуре корпусной стали 15X2НМФА.

Использование предложенной программы исследования позволило провести расчет эффективной энергии активации в соответствии с уравнением Аррениуса, который дал значение $\theta \approx 75\,000 \text{ Дж/моль}$.

Учитывая, что полученное значение весьма близко к энергии активации диффузии углерода в феррите, можно считать, что процесс термического старения контролируется диффузией углерода и связан с выделением карбидной фазы. Наиболее вероятно, что карбидной фазой, выделяющейся в процессе термического старения, является цементит Fe_3C , так как образование карбидов типа Me_7C_3 и Me_{23}C_6 , а также карбидов молибдена и ванадия происходит при температурах выше $400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, процесс образования этих карбидов (кроме Fe_3C) должен контролироваться диффузией легирующих элементов с эффективной энергией активации порядка $210 - 290 \text{ кДж/моль}$, значительно превышающей полученные значения.

Можно предположить, что зарождение новых выделений происходит на дислокациях в местах их повышенной плотности (внутри зерен) или по границам зерен. Прямым подтверждением данной гипотезы служат результаты электронномикроскопического анализа, проведенного в работе [2], где исследовалось

распределение карбидной фазы по границам и в теле зерна. Анализ показал, что в корпусной стали средний размер карбидов по границам зерен практически не меняется при длительностях старения до 10 тыс. ч. В то же время, средний размер карбидных частиц в теле зерна сначала уменьшается от $(151 \pm 7) \cdot 10^3 \text{ мкм}$ в исходном состоянии до $(81 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ мкм}$ после выдержки 3 тыс. ч. при $350 \text{ }^\circ\text{C}$ (выделяются мелкие карбиды, вызывая незначительное упрочнение и охрупчивание), а затем при увеличении длительности старения до 10 тыс. ч. несколько возрастает до $(109 \pm 6) \cdot 10^3 \text{ мкм}$ (происходит коагуляция и возврат свойств). Данный результат подтверждается экспериментами по изучению изменения коэрцитивной силы как характеристики, ответственной за дисперсность карбидной фазы [1].

Полученный результат позволяет предложить единый (карбидный) механизм термического старения стали 15X2НМФА(А) при $250 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$, согласно которому первая стадия изменения свойств – незначительное упрочнение и охрупчивание связана с образованием новых карбидных выделений, а вторая – возврат свойств – с последующей их коагуляцией.

На рис. 2 представлены экспериментальная кинетическая кривая ΔT_T в результате ТС при $375 \text{ }^\circ\text{C}$ длительностью до 25 тыс. ч., а также расчетная кривая ΔT_T в результате ТС при $320 \text{ }^\circ\text{C}$, которая является максимальной рабочей температурой данной корпусной стали на АЭС. Кривая для ТС при $320 \text{ }^\circ\text{C}$ получена путем пересчета режимов ТС с $375 \text{ }^\circ\text{C}$ на $320 \text{ }^\circ\text{C}$ с использованием полученной энергии активации. Расчетные длительности ТС при $320 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяют, согласно [3], обоснованно экстраполировать полученные ΔT_T на ресурс 60 лет.

Для получения прогнозных значений ΔT_T на ресурс 60 лет расчетная зависимость для ТС при температуре $320 \text{ }^\circ\text{C}$ была аппроксимирована в соответствии с [3] и расчетными результатами, полученными в настоящей работе (рис. 3) уравнением вида

$$\Delta T_T = 49,982 - 46,366[1 - e^{-0,000185\tau}]. \quad (1)$$

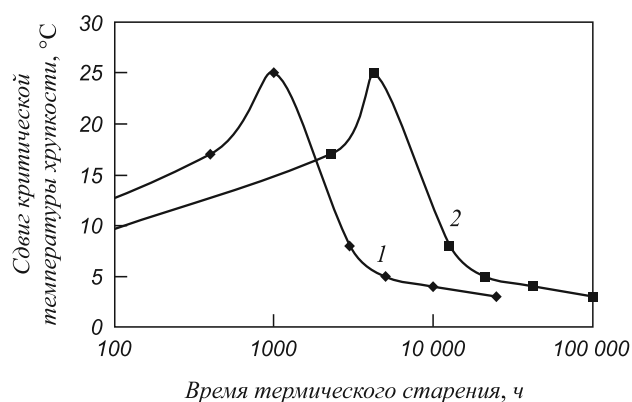


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетная (2) кинетическая зависимость сдвига критической температуры хрупкости стали 15X2НМФА

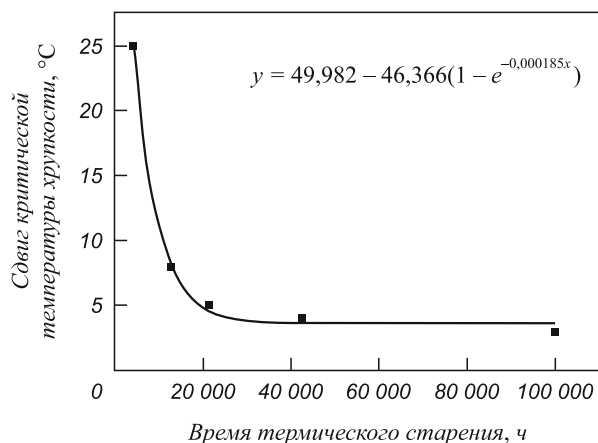


Рис.3. Аппроксимация кинетики термического старения стали 15X2NMFA при 320 °С

Согласно уравнению (1), при ресурсе τ около 60 лет (420 тыс. ч.) среднее значение ΔT_T составляет примерно 3,6 °С.

Таким образом, на базе аппроксимации расчетной зависимости $\Delta T_T(\tau)$ получена прогнозная оценка для ΔT_T материала оборудования на ресурс 60 лет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юханов В.А. // Труды ЦНИИТМАШ. 1980. № 155. С. 57 – 60.
2. Юханов В.А., Шур А.Д. // МиТОМ. 2006. № 7.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-002-86). Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

© 2013 г. А.А. Петелина, В.А. Юханов
Поступила 6 сентября 2013 г.

УДК 620.178

В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов

Нижегородский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 03Н18К9М5Т-ЭЛ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Рассмотрена корреляция параметров микропластической деформации с показателями сопротивления усталости. Исследованию подвергнута сталь 03Н18К9М5Т-ЭЛ (ВСК-210). Названная сталь подвергалась закалке с последующим отпуском при различных температурах.

Ключевые слова: температура отпуска, микропластическая деформация, закалка, циклическая деформация, усталость металла.

STEAL 03Н18К9М5Т-ЭЛ THERMIC TREATMENT IMPACT ON MICROFLOW AND REPEATED DEFORMATION PARAMETERS

Abstract. The paper addresses parameter correlation of microflow process with fatigue resistance results. The research has been performed on steel 03Н18К9М5Т-ЭЛ (ВСК-210). The mentioned steel has been subjected to hardening with further drawing at various temperatures.

Keywords: drawing temperature, microflow, hardening, repeated deformation, metal fatigue.

Вопросы поведения материалов при различных видах нагружения привлекают внимание многих исследовательских коллективов ввиду своей фундаментальной и прикладной значимости. Многочисленные исследования по микропластической и циклической деформации металлов и сплавов не дают достаточной информации о природе и кинетике их взаимодействия. В настоящее время не удается предвидеть всех сложных физических явлений, происходящих в инструментальных сталях при различных видах нагружения.

Целью работы являлось определение закономерностей изменения показателя сопротивления и предела усталости в зависимости параметров микропластической деформации при различных температурах отпуска стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ (ВСК-210).

О корреляции параметров микропластической и циклической деформации сообщалось в работе [1]. Экспериментальные измерения параметров микропластической деформации стали ВСК-210 показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, микроскопическая деформация наиболее заторможена при напряжениях ниже σ_2^0 (напряжение релаксации), выше этого напряжения величина $\Delta\sigma$ (приращение напряжения) начинает интенсивно и непрерывно возрастать с увеличением внешней нагрузки.

Для сталей с ОЦК – основной характерна так же независимость параметра $\Delta\sigma_2^0$ от приложенной нагрузки в определенном интервале напряжений. Это означает, что при одинаковом приращении внешней нагрузки ($\Delta\sigma_H$) наблюдается одинаковая величина