

УДК 539.4

УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЕЙ

А.П. Гопкало¹, А.И. Новиков², Ю.П. Кураш³

¹кандидат технических наук, e-mail: apg@ipp.kiev.ua

²кандидат технических наук, e-mail: nova1983@ukr.net

³младший научный сотрудник, e-mail: kurash@ipp.kiev.ua

^{1,2,3}Институт проблем прочности имени Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина

Аннотация. Представлены и проанализированы результаты испытаний стали 10GN2MFA на малоцикловую усталость и циклическую трещиностойкость при комнатной и повышенной температурах. Установлена корреляция между параметрами диаграммы циклического деформирования и кинетической диаграммы усталостного разрушения, температура для сталей с ферритно-перлитной структурой.

Ключевые слова: малоцикловое деформирование, циклическая трещиностойкость, циклическое упрочнение-разупрочнение, кинетическая диаграмма усталостного разрушения, температура, сталь 10GN2MFA.

ASCERTAINMENT OF RELATION BETWEEN CYCLIC CRACK GROWTH RESISTANCE AND PLASTISITY OF STEELS

A.P. Gopkalo¹, A.I. Novikov², Yu.P. Kurash³

¹Ph.D., e-mail: apg@ipp.kiev.ua

²Ph.D., e-mail: nova1983@ukr.net

³Junior researcher, e-mail: kurash@ipp.kiev.ua

^{1,2,3}G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The test results of 10GN2MFA steel at room and elevated temperatures under low cyclic loading and fatigue crack growth resistance are represented and analysed. The correlation between cyclic deformation and fatigue fracture diagrams parameters for steels with ferritic-pearlite structure have been ascertained.

Keywords: low-cycle straining, cyclic crack growth resistance, cyclic hardening-softening, fatigue crack growth curve, temperature, steel 10GN2MFA.

Введение. При проведении расчетов на живучесть и долговечность конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок, могут быть использованы различные аналитические зависимости для аппроксимации кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Чаще всего для описания линейной части зависимости успешно используют известное степенное уравнение Пэрриса-Эрдогана [1]. Вершина усталостной трещины в

материале представляет собой геометрический концентратор с весьма малым радиусом закругления, в связи с чем при нагружении в нем возникают значительные напряжения и деформации по фронту трещины, которые снижаются при удалении от вершины с интенсивностью, зависящей от уровня приложенной нагрузки и длины трещины. Это приводит к образованию пластической зоны, в которой при циклическом нагружении происходят процессы упрочнения - разупрочнения материала, характерные для его деградации в процессе усталости. Ввиду значительной концентрации напряжений в вершине трещины, можно предположить наличие в ней больших переменных пластических деформаций материала, соответствующих области малоциклового усталости, хотя такое деформирование происходит в достаточно локальном объеме материала.

В литературных источниках имеются результаты исследований по связи характеристик КДУР с циклическими пластическими деформациями в ее вершине. Эти связи установлены с использованием различных допущений о механизме и критериях разрушения материала, что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований этого вопроса для установления более прямых связей отмеченных характеристик. С этой целью выполнены испытания на циклическую трещиностойкость и малоцикловую усталость при жестком режиме нагружения корпусной стали для атомных реакторов 10ГН2МФА при комнатной и повышенной (543K) температурах, а также в водной среде. Полученные результаты представлены в виде КДУР и кривых малоциклового усталости в силовых и деформационных координатах. Из указанных кривых усталости получены диаграммы циклического деформирования для стадии стабилизации. Диаграммы используются в дальнейшем анализе в виде зависимости Осгуда-Рамберга, а линейный участок КДУР представлен зависимостью Пэриса-Эрдогана. Из анализа данных по малоциклового усталости следует, что исследуемая сталь является циклически разупрочняющейся при комнатной температуре и циклически упрочняющейся при повышенной. Это сказывается на том, что циклический предел текучести более высокий при повышенной температуре.

Цель работы проанализировать результаты испытаний стали 10GN2MFA на малоцикловую усталость и циклическую трещиностойкость при комнатной и повышенной температурах. Установить корреляция между параметрами диаграммы циклического деформирования и кинетической диаграммы усталостного разрушения, температуры для сталей с ферритно-перлитной структурой.

Материал для исследований. Для испытаний взята сталь 10ГН2МФА,

используемая в виде бесшовных труб для изготовления главных циркуляционных трубопроводов реакторов ВВЭР-1000, а также горячего коллектора парогенератора ПГВ-1000. Применяется после типовой термообработки, заключающейся в закалке с отпуском или нормализация с отпуском и дополнительных технологических отпусков в процессе изготовления [2]. Материал вырезан из горячего коллектора парогенератора после эксплуатационной наработки 200 тыс. час.

Испытания образцов на статический разрыв при комнатной и повышенной температурах дают осредненные по трем образцам значения пределов (σ_b) прочности и условных пределов текучести ($\sigma_{0,2}$), приведенные в табл.1. Металлографический анализ микроструктуры исследуемой стали свидетельствует о ее принадлежности к феррито-перлитному классу.

Таблица 1. – Средние значения характеристик кратковременной статической прочности стали 10ГН2МФА при температурах 20⁰С и 270⁰С

Температура, ⁰ С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
20	734,6	416,3
270	692,0	433,3

Цель и методика испытаний на малоцикловую усталость. Испытания на малоцикловую усталость при комнатной и повышенной температурах проводили при жестком режиме нагружения (при контроле амплитуды полной деформации) на воздухе. Нагружение осуществляли на модернизированной стандартной универсальной электрогидравлической машине 3201УЕ-20. Модернизация состояла в замене устаревших цифро-аналоговых блоков управления нагрузкой и отображения данных и сервоклапана на современный контроллер фирмы *BISS* с компьютером и соответствующим программным обеспечением и сервоклапан фирмы *BOSCH*. В процессе испытаний числовые значения усилий и деформаций от соответствующих датчиков в режиме *On Line* воспроизводятся в окнах монитора и в виде диаграмм деформирования. Параллельно данные испытаний по каждому циклу нагружения автоматически заносятся в базу данных компьютера в виде таблиц *Excel*. Образцы для испытаний имели круглое сечение диаметром рабочей части 9мм и ее длиной 27мм. На всех уровнях заданных в испытаниях деформаций поддерживали постоянной скорость деформирования $\epsilon_a = 0,006/с.$, что дает частоту $f \leq 0,3Гц$.

В испытаниях на малоцикловую усталость при повышенной температуре нагревание образцов осуществляли с помощью малогабаритной печи электросопротивления, на ленточные нагреватели которой подавали элек-

трический ток напряжением 10 В. Управление нагревом осуществляли с помощью специального блока нагрева [3], в котором сравниваются заданные и измеренные с помощью термопары, приваренной к образцу, значения температуры. В результате такого сравнения вырабатывается сигнал управления электрическим током первичной обмотки трансформатора для уменьшения расхождения между ними. Это обеспечивало поддержание температуры с погрешностью, не превышающей $\pm 3^\circ\text{C}$. Для предотвращения нагрева зажимов установлены медные холодильники с водяным охлаждением.

Методика испытаний на циклическую трещиностойкость. Экспериментальные исследования циклической трещиностойкости и выращивание предварительной усталостной трещины проводили на резонансной испытательной машине RUMUL TESTRONIC 50kN производства компании RUSSENBERGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцария). При этом использованы компактные образцы с одним боковым надрезом, нагруженные внецентренным растяжением. Нагружение выполнялось по синусоидальному закону с частотой $f = 60$ Гц при коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$. Частота циклического нагружения обусловлена колебательной системой установки, элементом цепи которой является и образец. Колебательная система контролируется и возбуждается резонатором, который возбуждается с помощью небольшого электромагнита.

При проведении исследований на циклическую трещиностойкость используется программное обеспечение RUMUL Crackgrowth. В этом программном обеспечении определены размах коэффициента интенсивности напряжений и другие требования к проведению экспериментов, обработке и анализу результатов выполнены в соответствии с рекомендациями нормативных документов [4, 5]. В испытаниях на циклическую трещиностойкость при повышенной температуре компактный образец помещался в печь электросопротивления со спиральными нагревателями. Перед началом исследований проводили налаживание системы прецизионного регулирования температуры ВРТ-3 и термометрирования образца с помощью термопар, приваренных по линии роста трещины и на некотором расстоянии от нее. Данные термометрирования образца показывают, что температура по линии роста трещины изменяется не больше чем на 1,02%. Погрешность поддержания температуры не превышает $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Результаты испытаний на малоцикловую усталость и их анализ. Экспериментальные данные по малоцикловой усталости стали 15ГН2МФА получены в виде кинетики петель упруго-пластического деформирования на выбранных уровнях амплитуд деформирования от начала нагружения и до

полного разрушения образцов. Результаты испытаний обработаны по методу наименьших квадратов и представлены в виде линий регрессии в деформационных и силовых координатах:

$$\varepsilon_{in} \cdot N_p^k = C; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{in} \cdot N_p^k = C; \quad (2)$$

$$\sigma_a = A + B \lg N_p. \quad (3)$$

Значения амплитуды напряжений в зависимости (3) взяты на участке ее стабилизации или при текущем значении числа циклов нагружения равном $n=N/2$. На рис. 1 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующие их линии регрессии в соответствии с уравнениями (1) - (3).

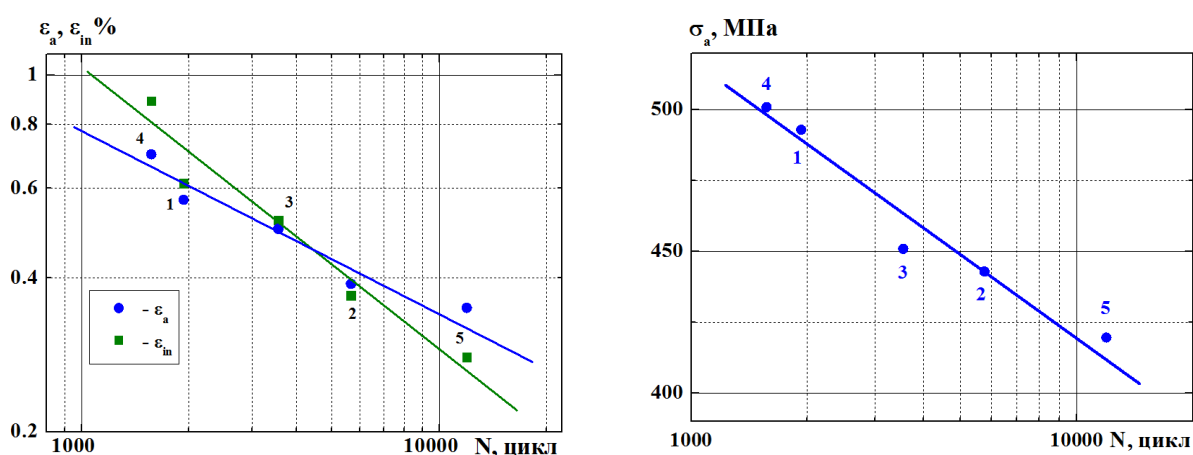


Рисунок 1 – Экспериментальные точки и регрессионные зависимости циклической долговечности образцов при $T=20^{\circ}\text{C}$ от: амплитуды упруго-пластической деформации и пластической деформации за цикл (левый рисунок); амплитуды напряжений (правый рисунок). 1...5 - номера образцов

Наблюдается достаточно тесная корреляция результатов испытаний с коэффициентами корреляции, близкими к функциональной зависимости (0,97...0,99). На рис.2 полученные данные испытаний приведены в виде кинетики условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ в процессе циклического деформирования образцов. Нанесены также значения условного предела текучести, определённого при кратковременных статических испытаниях.

Согласно приведенным на рис.2 данным, при циклическом нагружении на высоких уровнях амплитуд деформаций сталь 15ГН2МФА проявляет свойства, характерные для циклически разупрочняющихся материалов: с увеличением числа циклов нагружения значения условного предела текучести снижаются. Наблюдаемое в опытах резкое уменьшение максимальных напряжений цикла (напряжений растяжения) после наработки до опре-

деленного числа циклов нагружения соответствовало появлению и развитию макротрещины усталости. На рис.2 это выражено в резком падении условного предела текучести. Подобные экспериментальные данные по малоциклового деформированию и разрушению получены при температуре 270⁰С.

На рис.3 в таких же координатах, как на рис.1, представлены результаты испытаний. Из сравнения данных рис.1 и рис.3 следует:

- кривые усталости в силовых координатах при температуре 270⁰С лежат значительно выше кривых при комнатной температуре: имея близкие значения угла наклона кривых усталости, разница в амплитудах напряжения составляет ~164 МПа при долговечности 10⁴ цикл;

- кривые в деформационных координатах на рис.3 пересекаются при меньших долговечностях, чем на рис.1; это косвенно свидетельствует о том, что при повышенной температуре разрушение происходит при меньших уровнях пластической деформации и более высоких значениях упругих деформаций.

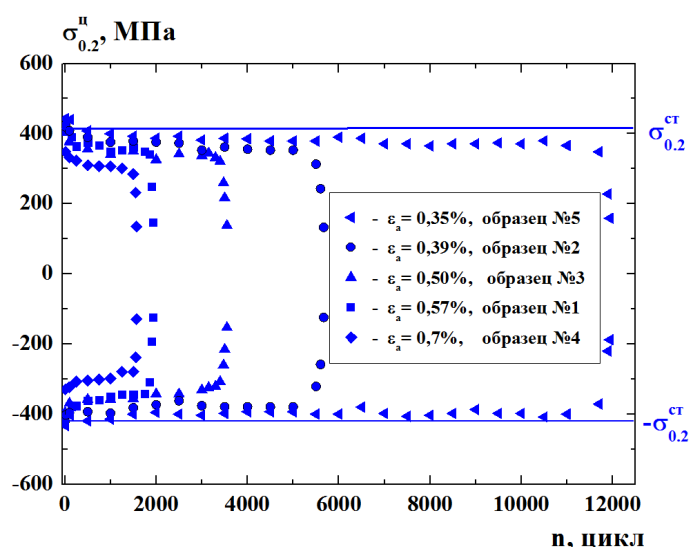


Рисунок 2 – Кинетика циклического предела текучести $\sigma_{0,2}^H$ в процессе малоциклового деформирования образцов на разных уровнях ϵ_a , T= 20⁰С.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных в координатах уравнений (1), (2), (3) приведены в табл.2.

Таблица 2. – Расчетные коэффициенты уравнений (1), (2), (3)

Температура, °С	(1)		(2)		A	B
	k	C	k	C		
20	2,83	14,58	1,79	20,57	813,39	-98,45
270	2,86	17,49	3,03	20,71	943,12	-89,94

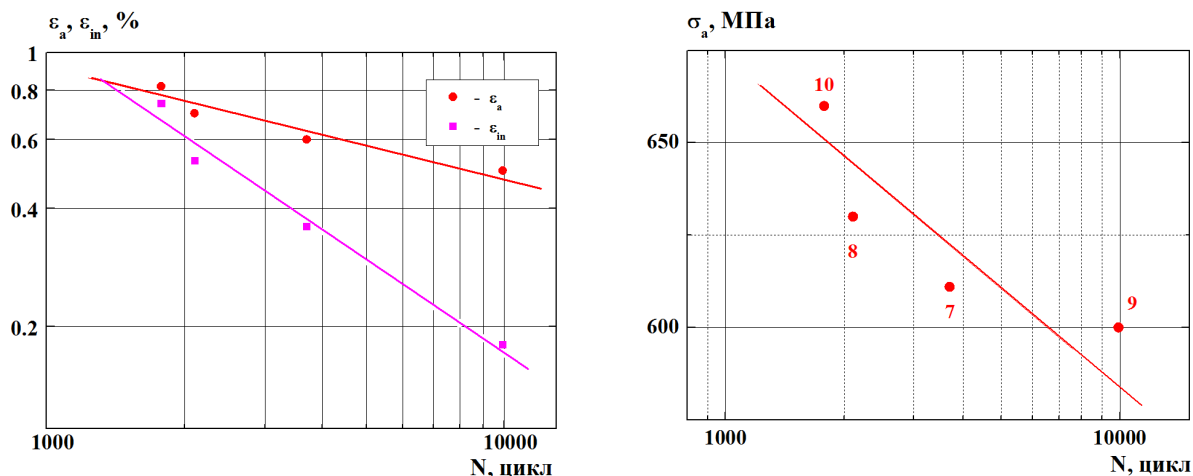


Рисунок 3 – Экспериментальные точки и регрессионные зависимости циклической долговечности образцов при $T=270^{\circ}\text{C}$ от: амплитуды упруго-пластической деформации и пластической деформации за цикл (левый рисунок); амплитуды напряжений (правый рисунок). 7...10 - номера образцов

Отмеченные различия в кривых усталости тесно связаны с различием в кинетике пластического деформирования стали при комнатной и повышенной температурах. Как видно из рис.4, в процесс циклического нагружения величина условного предела текучести увеличивается, т.е. наблюдается циклическое упрочнение стали, хотя при комнатной температуре сталь проявляла циклическое разупрочнение. Ввиду этого процесса величина условного предела текучести на стадии стабилизации деформирования значительно превосходит его начальное значение, которое было приблизительно равным при комнатной и повышенной температурах в первых циклах нагружения, а также незначительно различалось при кратковременных статических испытаниях (табл.1). Подобно условному пределу упругости с увеличением числа циклов нагружения увеличивался размах напряжений за цикл. Принимая во внимание то, что сталь 10ГН2МФА проявляет циклическое разупрочнение при комнатной температуре и циклическое упрочнение при повышенной температуре, в дальнейших исследованиях принято, что испытывается два материала с феррито-перлитной структурой, имеющих различную кинетику усталостного повреждения [6].

Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость и их анализ. В связи с установленным в приведенных выше испытаниях различием в кинетике усталостного повреждения стали 10ГН2МФА при комнатной и повышенной температурах и известных связях характеристик малоцикло-вой пластичности со скоростью роста усталостной трещины представляет интерес исследование влияния этого фактора на циклическую трещиностойкость материалов с различной кинетикой малоцикло-вой пластичности.

Таких сопоставлений в литературных источниках не было обнаружено. При исследовании циклической трещиностойкости в данной работе использовали две рекомендованные методики испытаний [3, 4]: с убыванием размаха коэффициента интенсивности напряжений и с постоянной величиной нагрузки. Методика испытаний с убыванием размаха коэффициента интенсивности напряжений используется для скоростей роста трещины $(da/dN) < 10^{-8}$ м/цикл [3, 4]. Методика испытаний с постоянной амплитудой нагрузки используется для скоростей роста усталостных трещин, которые превышают 10^{-8} м/цикл [3, 4]. По этой методике образец нагружается постоянной нагрузкой до разрушения или пока не будет достигнуто самое большое допустимое значение ΔK или длины трещины.

Описанные способы испытаний на циклическую трещиностойкость реализованы в испытаниях при комнатной и повышенной температурах. На рис.5 приведены результаты этих испытаний и аппроксимация линейного участка кинетической диаграммы усталостного разрушения линией регрессии, представляющей (1) в логарифмических координатах.

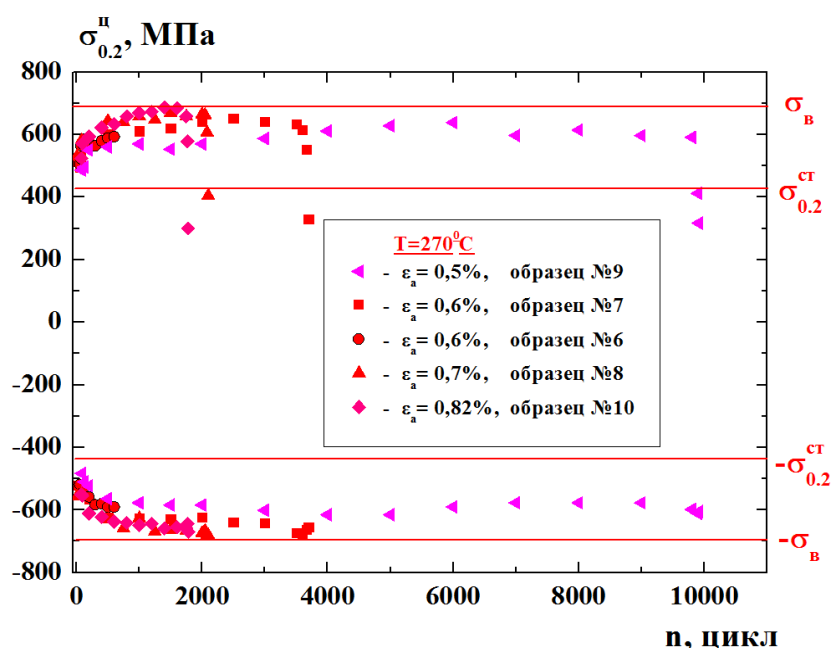


Рисунок 4 – Кинетика циклического предела текучести $\sigma_{0.2}^y$ в процессе малоциклового деформирования образцов на разных уровнях ε_a , $T=270^{\circ}\text{C}$.

По приведенным на рис.5 результатам видно существенное различие в характере расположения экспериментальных точек при температурах 20°C и 270°C , протяженности линейного участка диаграмм и его наклоне, скоростях роста усталостной трещины, при которых происходит отклонение экспериментальных точек от линейной зависимости. Эти характеристики подтверждаются и результатами обработки численных данных испытаний,

выраженными через константы уравнения (1) в табл.3.

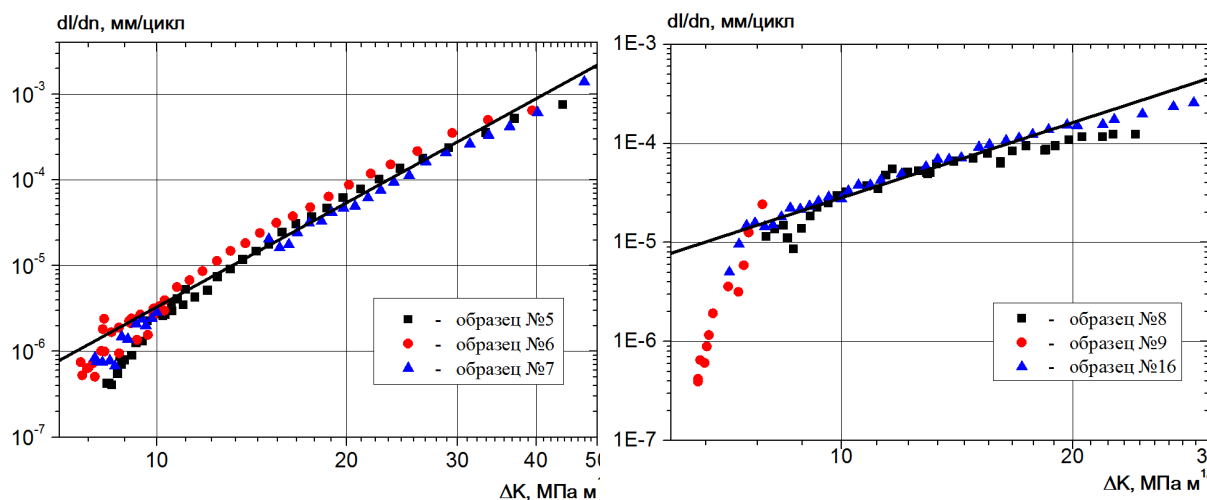


Рисунок 5 – Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали 10ГН2МФА при температурах 20°С (а) и 270°С (б)

Таблица 3. – Расчетные значения констант m и C уравнения (1)

Температура, °С	Константы уравнения (1)	
	m	C
20	4,0324	$4,11 \cdot 10^{-10}$
270	2,5348	$7,21 \cdot 10^{-8}$

Определение порогового значения размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} в соответствии с [3, 4] проводили путем построения аппроксимирующей прямой линейной регрессии $\log(da/dN) = f(\log \Delta K)$, используя точки $(da/dN, \Delta K)$, расположенных в области скоростей роста 10^{-9} и 10^{-10} м/цикл. Значения ΔK , соответствующие скорости роста 10^{-10} м/цикл, рассчитывали, используя указанную выше прямую и это значения ΔK принято за ΔK_{th} [3, 4]: $\Delta K_{th} = 8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при $T=20^\circ\text{C}$ и $\Delta K_{th} = 6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при $T=270^\circ\text{C}$. Так же обращено внимание на тесную взаимосвязь коэффициентов деформационного упрочнения (n') и углов наклона линейного участка КДУР (m). Отмечена тенденция стремления показателя степени в уравнении Пэриса-Эрдогана к значению $m=1$ для идеально упругопластического материала, то есть при $n'=0$. В соответствии с зависимостью изменение коэффициентов деформационного упрочнения в известных для материалов пределах $n'=(0..0,25)$ дает соответственно $m=(1..5,5)$, что соответствует имеющимся данным по трещиностойкости сталей. Таким образом, предполагается, что точка с координатами ($m=1; n'=0$) может быть полюсом, из которого для других материалов и асимметрий циклов выходят лучи, дающие другие значения для m . Установление таких соотношений позволит определять угол

наклона КДУР по значениям коэффициентов деформационного упрочнения. Наличие общей точки на КДУР для данного класса материалов при больших скоростях роста усталостной трещины позволяет построить линейный участок КДУР по результатам малоцикловых испытаний.

Вывод.

1. Повышение температуры малоцикловых испытаний с 20⁰С до 270⁰С приводит к изменению кинетики пластических деформаций в процессе нагружения образцов из стали 10ГН2МФА от начала испытаний до разрушения: циклическое разупрочнение при температуре 20⁰С меняется на циклическое упрочнение при температуре 270⁰С, не смотря на то, что такое увеличение температуры не приводит к фазовым изменениям структуры.

2. В испытаниях на циклическую трещиностойкость также наблюдается существенное различие в сопротивлении росту трещины при комнатной и повышенной температурах: при T=270⁰С угол наклона линейного участка диаграммы усталостного разрушения уменьшается в ~1,6 раза, а также уменьшается диапазон изменения скоростей роста трещины и коэффициента интенсивности напряжений на этом участке диаграммы по сравнению с испытаниями при комнатной температуре.

3. Выявленное в экспериментах влияние повышенной температуры на характер кинетики малоциклового пластического деформирования и соответствующему ему усталостного повреждения стали 10ГН2МФА отражается на изменении характеристик ее циклической трещиностойкости при испытанных температурах. Этот результат предполагает установление новых взаимосвязей между характеристиками циклической трещиностойкости и малоциклового пластического деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paris P.C., Erdogan F.A. A critical analysis of crack propagation laws // Trans ASME. J. Bas. Eng. 1963. N. 4. P. 528-534.

2. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Пышный В.М., Митрофанов А.С., Гоженко С.В., Савченко В.И., Брык В.В., Рыбальченко Н.Д. Использование микрообразцов для контроля механических свойств и эволюции микроструктуры основного металла главного циркуляционного трубопровода (сталь 10ГН2МФА) энергоблока № 1 ОП ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // Четырнадцатая Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению: Труды конференции. 12–17 июня 2000г.; г.Алушта. – Харьков.– 2000. – С.63–72.

3. Гопкало А.П., Теслюк Н.Н. Устройство для обеспечения испытаний материалов при совместном действии механических нагрузок и иклического нагрева на стандартной малоцикловой испытательной машине // Пробл. проч. –2001. – № 3. – С.123 – 127.

4. ASTM E647. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

5. ISO 12108. Metallic materials. Fatigue testing. Fatigue crack growth method.

6. Tsyban'ov G.V., Novikov A.I. Ultimate hardening/softening model of material for fatigue crack initiation onset and determination of its parameters // International Journal of Fatigue. – 2012. – Volume 39. – P. 15–24.

УДК 621.879.31

ТЕХНІЧНА І ВИРОБНИЧА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕКСКАВАТОРА ЭО-5123 ЗІ ЗМІННОЮ ФРЕЗЕРНОЮ ГОЛІВКОЮ

Є.В. Зозуля¹, М.М. Ходневич², М.М. Балака³

¹студент групи БМО-22с, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: zozulya_ev@ukr.net

²студент групи БМО-12с, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: m.hodnevich@gmail.com

³асистент кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: maxim.balaka@gmail.com

Анотація. Застосування змінної фрезерної голівки на екскаваторі ЭО-5123 дозволяє розкривати підземні комунікації, планувати профіль траншей та котлованів, земляні полотно під фундаменти, розпушувати мерзлі нерудні матеріали, виконувати аварійно-відбудовні роботи. Розроблено річний план технічного обслуговування і ремонту, карту змащення вузлів і агрегатів екскаватора. Наведено особливості технології виконання земляних робіт екскаватором зі змінною фрезерною голівкою.

Ключові слова: екскаватор, змінна фрезерна голівка, експлуатація.

TECHNICAL AND PRODUCTION OPERATION OF THE EO-5123 EXCAVATOR WITH A REPLACEABLE MILLING HEAD

Eugene Zozulya¹, Mykola Hodnevich², Maxim Balaka³

¹Student of group BMO-22s, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: zozulya_ev@ukr.net

²Student of group BMO-12s, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: m.hodnevich@gmail.com

³Assistant of Building Machinery Department, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: maxim.balaka@gmail.com

Abstract. The use of a replaceable milling head on the EO-5123 excavator allows to open underground communications, to plan the profile of trenches and excavations, subgrade for foundations, to loose frozen non-metallic materials, to perform emergency-recovery works. An annual plan for maintenance and repair, a lubrication map for units and aggregates of an excavator are developed. The features of the earthmoving technology for excavator with a replaceable milling head are given.

Keywords: excavator, replaceable milling head, operation.