

УДК 620.178.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-118

Э.И. Мансырев¹, А.В. Емельянов², Д.Э. Мансырев³

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ СПЛАВА ХН45МВТЮБР-ИД ПРИ СИММЕТРИЧНОМ МЯГКОМ МАЛОЦИКЛОВОМ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ



¹Энвер Ибрагимович Мансырев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921)907-68-53, E-mail: enver.mansyrev@yandex.ru



²Емельянов Антон Владимирович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(981)711-91-54, E-mail: em-ant1990@yandex.ru



³Дмитрий Энверович Мансырев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921)405-26-25, E-mail: dm.mansurev@gmail.com

Аннотация

На основании результатов испытаний цилиндрических образцов из сплава ХН45МВТЮБР-ИД на малоцикловую усталость при симметричном мягком нагружении установлены особенности поведения этого сплава в условиях циклической ползучести при комнатной температуре. Установлена граница начала развития циклической ползучести при симметричном нагружении. Предложен упрощённый вариант способа оценки циклической ползучести, удобный для технических приложений.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, симметричное мягкое нагружение, циклическая ползучесть, упрощенная оценка скорости циклической ползучести.

1. Введение

Оценка прочности различного рода конструкций и машин, испытывающих циклические воздействия, обычно связана с изучением механических свойств материалов, из которого изготовлены конструкционные элементы. Различают приводящие к исчерпанию прочности многоцикловые и малоцикловые нагружения [5, 6, 9 и другие], последние отличаются от первых развитием в конструкционных элементах заметных пластических циклических деформаций. По установившейся в литературных источниках практике под термином мягкое нагружение понимают такие виды нагружений, при которых контролируются и остаются стабильными величины максимальных и минимальных за цикл нагрузок (напряжений), в отличие от жесткого нагружения, при котором оказываются постоянными аналогичные величины деформаций. В условиях многоциклового усталости, которая не сопровождается развитием пластических составляющих деформаций, оба типа нагружений, оказываются неразличимыми.

На «полной» кривой усталости [7, 8] (рис. 1) принято выделять различные области, при этом в области малоциклового усталости выделяют также и область циклической ползучести, – в пределах этой области деформирование сопровождается односторонним накоплением пластических составляющих деформаций.

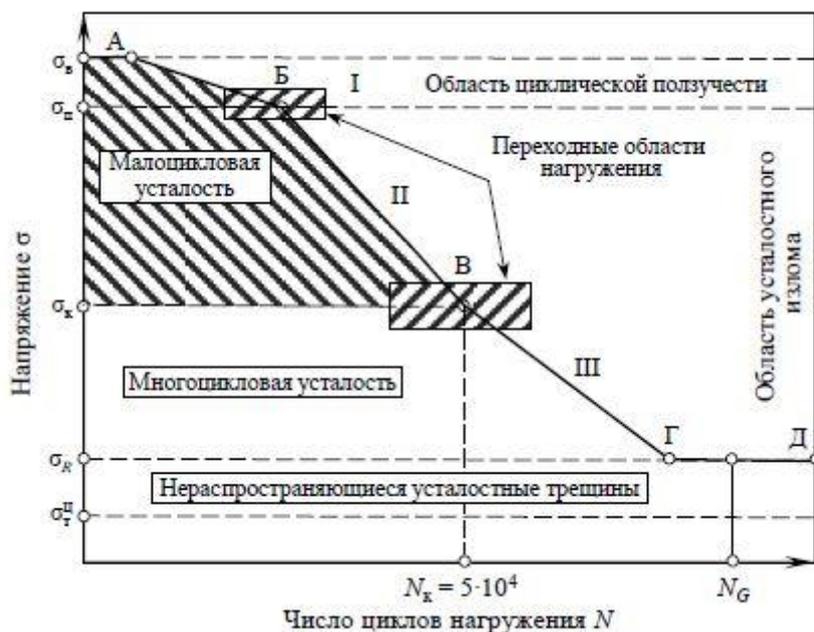


Рис. 1. Схема «полной» кривой усталости по [8].

Как известно, область циклической ползучести при мягком нагружении в основном зависит от коэффициента асимметрии цикла $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, где σ_{\max} и σ_{\min} – наибольшее и наименьшее напряжение цикла, а также от

других факторов, таких, например, как характер упрочнения металла, температура окружающей среды, структура материала и тому подобных. При симметричных циклах нагружения и идеальном совпадении пределов текучести при растяжении и сжатии, а также идеальном совпадении законов изотропного упрочнения (или разупрочнения) при растяжении и сжатии, можно ожидать отсутствие циклической ползучести. Однако свойства реальных металлических сплавов обычно отличаются от идеальных свойств, поэтому актуальной для технических приложений остается эмпирическая оценка свойств циклической ползучести для таких материалов.

2. Испытания на малоцикловую усталость при симметричном мягком нагружении сплава ХН45МВТЮБР-ИД

Испытаниям на малоцикловую усталость предшествовали испытания 7-ми образцов на статическое растяжение, в результате которых были определены средние величины предела текучести $R_{p0.2} = 904$ МПа и временного сопротивления $R_m = 1292$ МПа для рассматриваемого сплава.

Испытания 13-ти стандартных цилиндрических образцов (рис. 2) с диаметром рабочей части 5 мм при комнатной температуре на малоцикловую усталость при симметричном растяжении-сжатии ($R_\sigma = -1$) с управлением по усилию (первый цикл нагружения соответствовал растяжению) с частотами $0,3 \div 3,0$ Гц выполнялись на оборудовании INSTRON 8802 (полученная кривая усталости приведена на рис. 3, база испытаний 70 тысяч циклов).

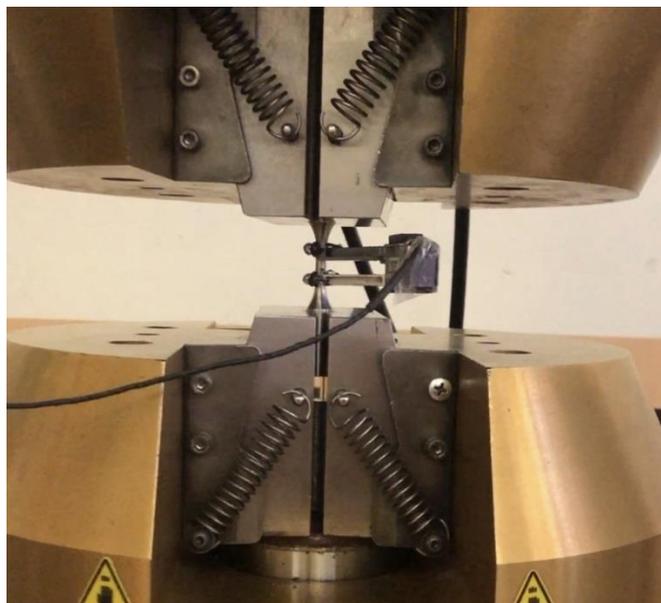


Рис. 2. Образец для испытаний на усталость.

Стандартная статистическая обработка результатов испытаний [1, 3, 6, 10] соответствовала широко распространенному уравнению Basquin'a [3, 5,

6, 7 и другие] $\sigma_a(N) = C * N^{-\alpha}$, где σ_a – амплитуда напряжения (МПа), которая при симметричных циклах нагружений совпадает с максимальным напряжением цикла σ_{max} ; N – долговечность (цикл.); $C = 1312,6$ и $\alpha = 0,051$ – коэффициенты уравнения Basquin'a (соответствующая кривая усталости, построенная методом наименьших квадратов, приведена на рис. 3).

Полученные с помощью сертифицированного программного обеспечения INSTRON LCF3 [11] цифровые записи параметров испытаний каждого образца позволили в каждом цикле разделить полные деформации на упругие ε_e и пластические ε_p составляющие (полная деформация $\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p$),

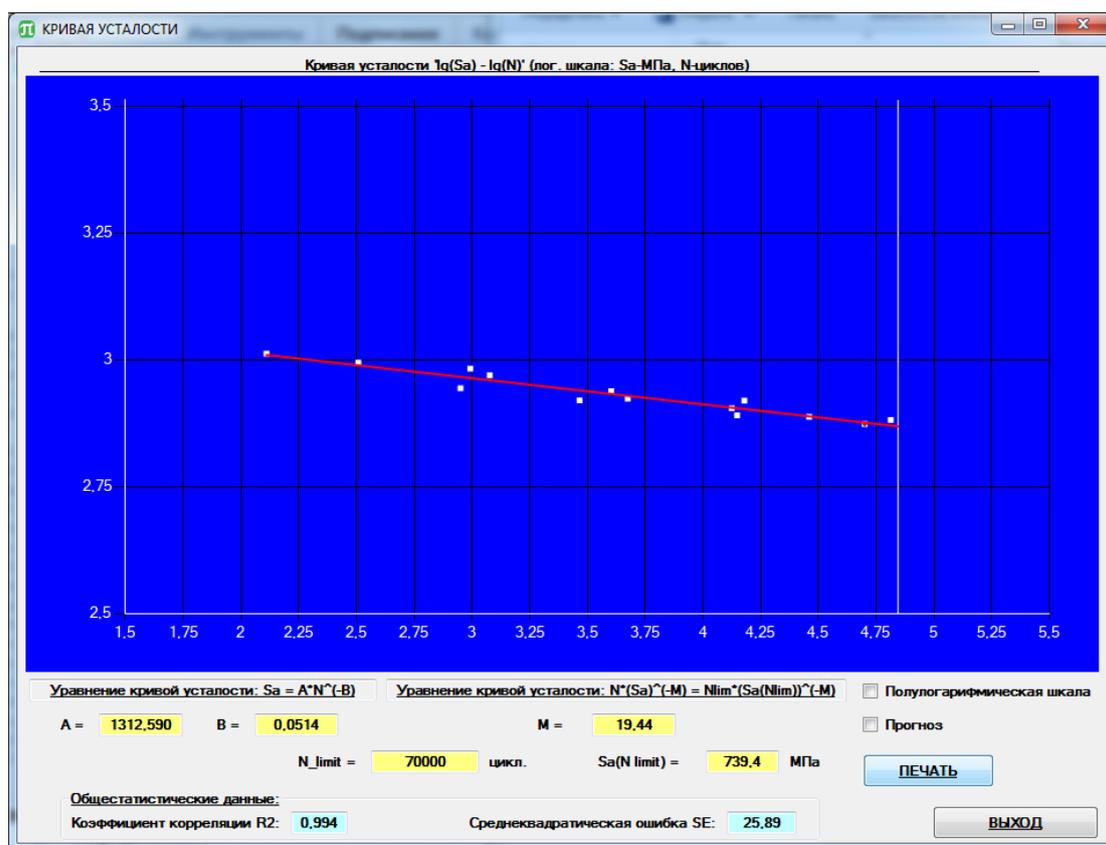


Рис. 3. Кривая малоциклового усталости (мягкое нагружение) сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

регистрировать и сохранять циклограммы напряжений и компонент деформаций (примеры типичных циклограмм для двух образцов, в которых развивались значительные циклические пластические деформации, приведены на рис. 4), а также петли упругопластического гистерезиса (для тех же образцов, рис. 5).

Более детальное рассмотрение цифровых записей представляющих интерес параметров испытаний на малоцикловую усталость с целью оценки эффекта циклической ползучести изучаемого сплава приведено в следующем параграфе.

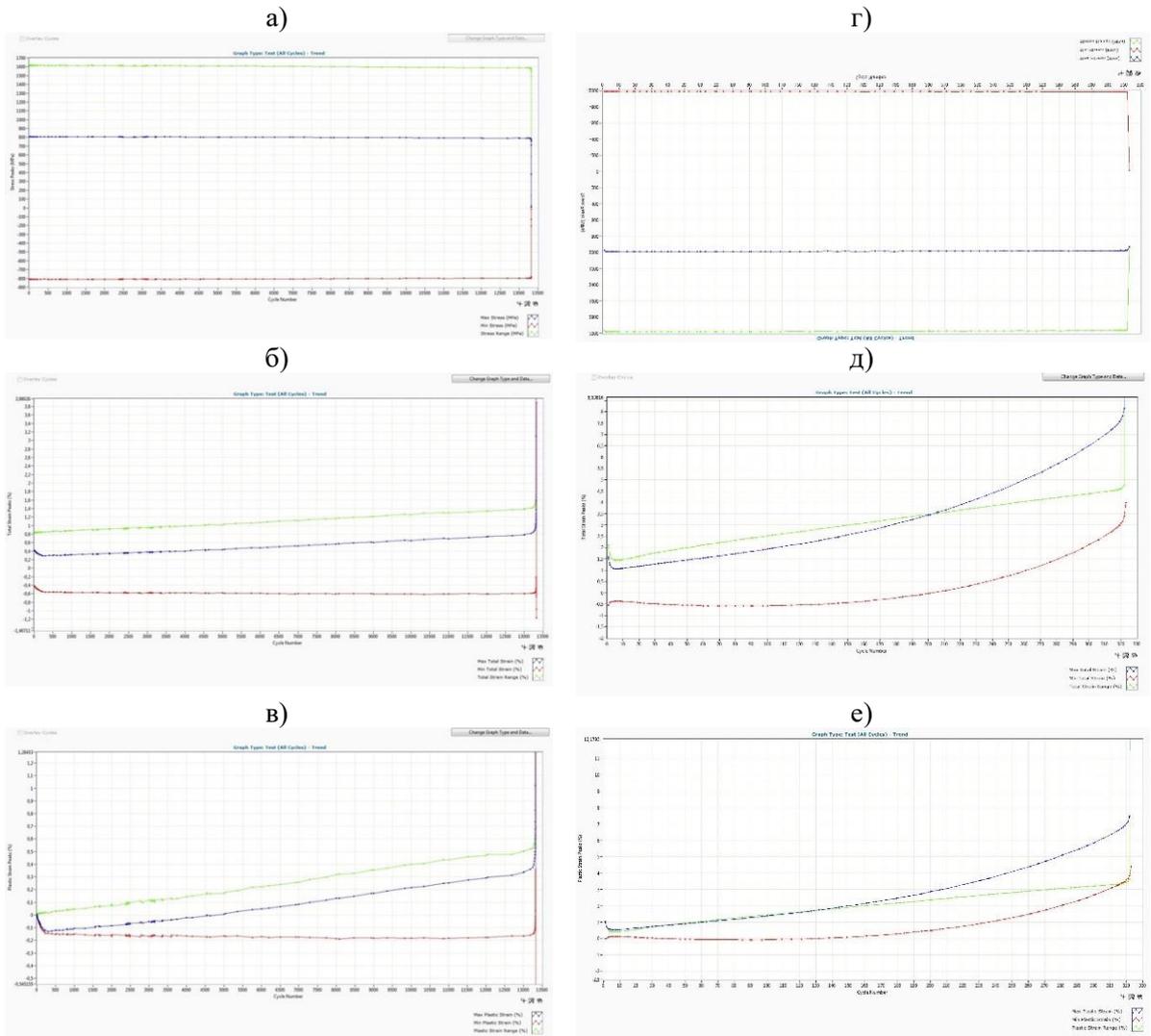


Рис. 4. Циклограммы напряжений (а, г), полных деформаций (б, д) и пластических составляющих деформаций (в, е) для образцов № 7 (левая колонка, долговечность образца 13323 цикла) и № 13 (правая колонка, долговечность образца 129 циклов) – наибольшая величина в цикле (синий цвет), наименьшая величина в цикле (красный цвет) и размах (зеленый цвет) – разность наибольшей и наименьшей величин.

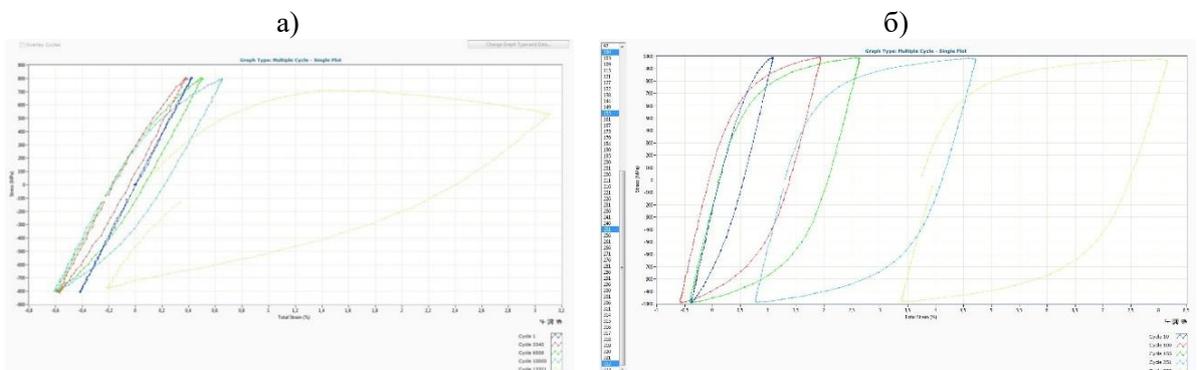


Рис. 5. Графики петель упругопластического гистерезиса (а – образец № 7; б – образец № 13) – построены не менее чем по 100-а точкам для каждого цикла.

3. Циклическая ползучесть сплава ХН45МВТЮБР-ИД при симметричных циклах нагружений

Представленные на рис. 4 циклограммы деформаций (и аналогичные циклограммы для остальных образцов) свидетельствуют о том, что рассматриваемый сплав следует отнести к циклически разупрочняющемуся классу материалов, для которого на начальном этапе нагружений минимальные величины деформаций несколько снижаются и затем либо увеличиваются, либо стабилизируются, максимальные величины деформаций монотонно увеличиваются, а амплитуды (размахи) деформаций также стабильно увеличиваются по мере нарастания числа циклов.

Отказываясь от распространенного и трудоемкого отдельного анализа полупериодов [6, 8, 10 и другие] из-за возможно большого их числа до разрушения и эффективного для циклически стабильного материала, введем в рассмотрение среднюю пластическую деформацию цикла, – величину, равную полусумме измеренных непосредственно в процессе испытания максимальной и минимальной пластической деформации в цикле (рис. 6)

$$\varepsilon_{p,med} = (\varepsilon_{p,max} + \varepsilon_{p,min})/2. \quad (1)$$

Эта мера, как и определённые в процессе испытания пластические деформации $\varepsilon_{p,max}$ и $\varepsilon_{p,min}$, тоже характеризует фактически накопленную за счет усталостного нагружения пластическую деформацию.

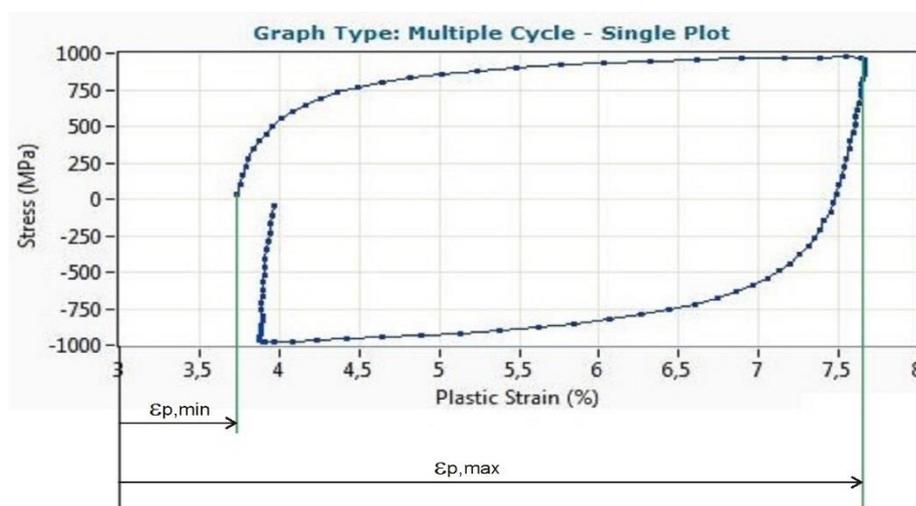


Рис. 6. Образец № 13, 320-ый цикл, петля упругопластического гистерезиса «напряжение, МПа – пластическая деформация, %» (количество циклов до разрушения – 323).

Как известно, фактическому разрушению образца (разделению на отдельные части) предшествует непродолжительный по сравнению с общей долговечностью этап развития в образце магистральной трещины (почти

вертикальные участки на циклограммах, рис. 4). На этом этапе регистрируемые испытательным оборудованием петли упругопластического гистерезиса приобретают заметные искажения своей формы (последние петли на рис. 5), – полуциклы растяжения имеют меньший наклон по отношению к вертикальной оси (оси σ_a) чем полуциклы сжатия за счет ослабления поперечного сечения образца магистральной трещиной. Фактически этот этап подчиняется физическим законам циклической трещиностойкости, но его продолжительность обычно пренебрежимо мала по сравнению с общей долговечностью образца. Поэтому анализом деформаций на этом этапе нередко пренебрегают при общей оценке долговечности в условиях малоциклового усталости.

Воспользуемся понятием «средней» скорости пластической деформации, понимая под ней отношения достигнутых $\varepsilon_{p,max}$, $\varepsilon_{p,min}$ или $\varepsilon_{p,med}$ в момент разрушения к долговечности образца, выраженной в количестве достигнутых циклов к моменту разрушения N (stress life). Эта характеристика кинетики процесса накопления пластических деформаций в образце строго говоря весьма грубо соответствует своему привычному названию скорости: первый цикл мягкого нагружения приводит к фактическому скачку аналогичной «мгновенной» скорости; заключительные циклы соответствуют «лавинообразному» нарастанию деформаций вследствие развития в образце магистральной трещины.

Поэтому, при определении «средней» скорости циклической ползучести (то есть «средней» скорости пластической деформации) исключался первый цикл, а также и финальные несколько циклов развития магистральной трещины. Предполагается, что такая мера позволит прогнозировать не только силовые условия разрушения по истечении наработанного количества циклов (кривая усталости), но и оценить достигнутые к моменту разрушения необратимые (пластические) деформации циклической ползучести в элементах изделий из рассматриваемого сплава с помощью выражения:

$$\varepsilon_{p,f} = \varepsilon_{p,1} + v_{cr} \cdot N_f, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{p,1}$ – пластическая деформация, достигнутая в первом цикле нагружения, она может быть определена по диаграмме статического растяжения с последующим сжатием до достигнутого уровня напряжения при растяжении; v_{cr} – «средняя» скорость циклической ползучести, зависящая от амплитуды напряжения σ_a ; N_f – долговечность, также зависящая от σ_a . Последние две величины из перечисленных могут быть определены по кривой малоциклового усталости. Величина таким образом вычисленной пластической деформации $\varepsilon_{p,f}$ может представлять необходимый интерес при проектировании конкретных деталей и конструкционных элементов.

Для определения зависимости «средней» скорости циклической ползучести сплава ХН45МВТЮБР-ИД анализу подверглось множество петель гистерезиса, полученных в результате испытаний. Величины остаточных деформаций определялись по петлям гистерезиса для циклов, отстоящих в среднем на 9 циклов от фактической долговечности по началу момента искажения петель гистерезиса, и относились к таким образом скорректированным долговечностям. В результате вычисленные «средние» скорости циклической ползучести сопоставлялись величинам вызвавших их амплитудам напряжений (рис. 7). Полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных регрессии в виде полиномов 5-го порядка позволили установить зависимости «средних» скоростей циклической ползучести от амплитуды напряжения при симметричных циклах нагружения (коэффициенты регрессий также приведены на рис. 7).

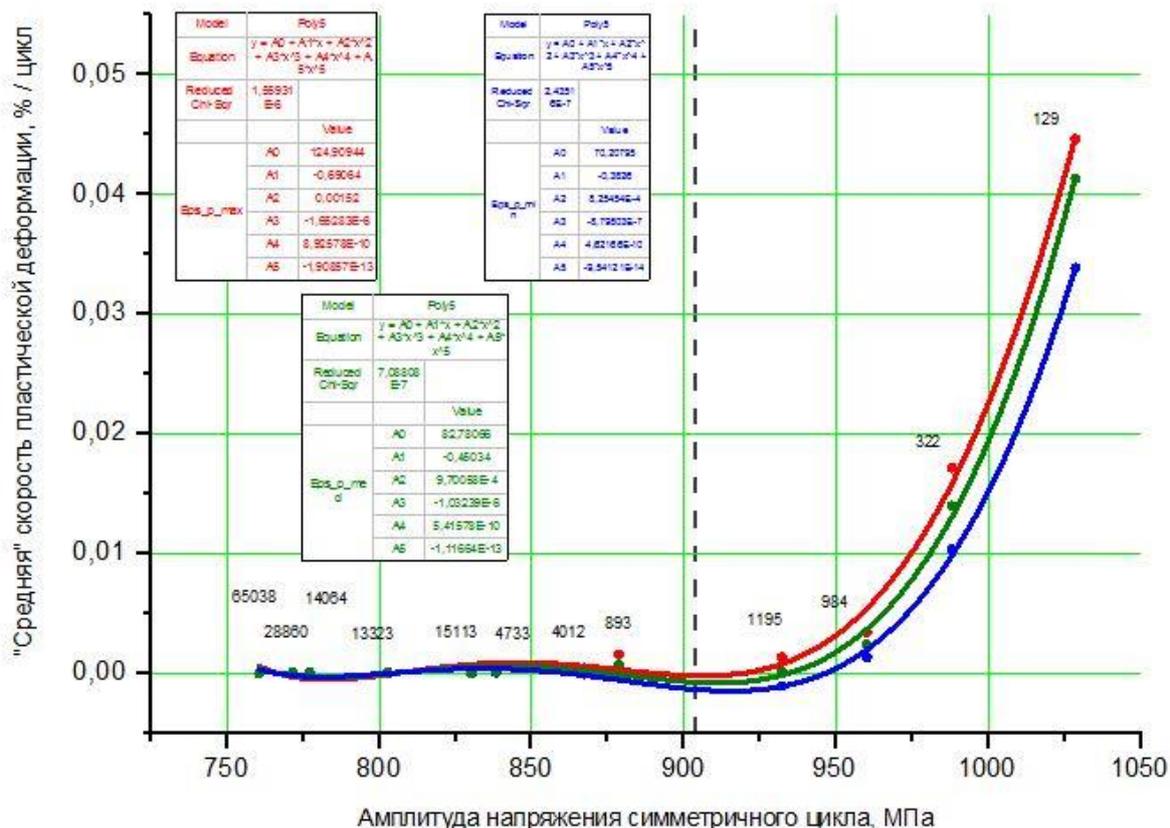


Рис. 7. Зависимость «средней» скорости циклической ползучести от амплитуды напряжения: красный цвет – определенная по $\epsilon_{p,max}$; синий цвет – по $\epsilon_{p,min}$; зеленый цвет – по $\epsilon_{p,med}$, над экспериментальными точками указаны фактические долговечности образцов.

Рассмотрим полученные результаты, представленные на рис. 7. Очевидно, что чем ниже уровень амплитуды напряжений, тем выше долговеч-

ность, при этом сопутствующее накопление циклических пластических деформаций происходит на большем числе циклов, но с меньшей скоростью. Вертикальная штриховая линия на рис. 7 соответствует статическому пределу текучести (904 МПа), однако наличие заметных средних скоростей циклической ползучести начинается несколько ранее. Известно, что циклический предел текучести отличается от статического в меньшую сторону [12, 13 и другие], однако его величину удастся установить лишь по диаграмме Коффина-Мэнсона, полученной после испытаний на малоцикловую усталость при жестком нагружении. Весьма приближенная и грубая оценка циклического предела текучести рассматриваемого сплава по результатам испытаний при мягком нагружении (параметры циклов при полудолговечностях образцов рассматривались как параметры циклов при жестком нагружении) привела к результатам, приведенным на рис. 8.

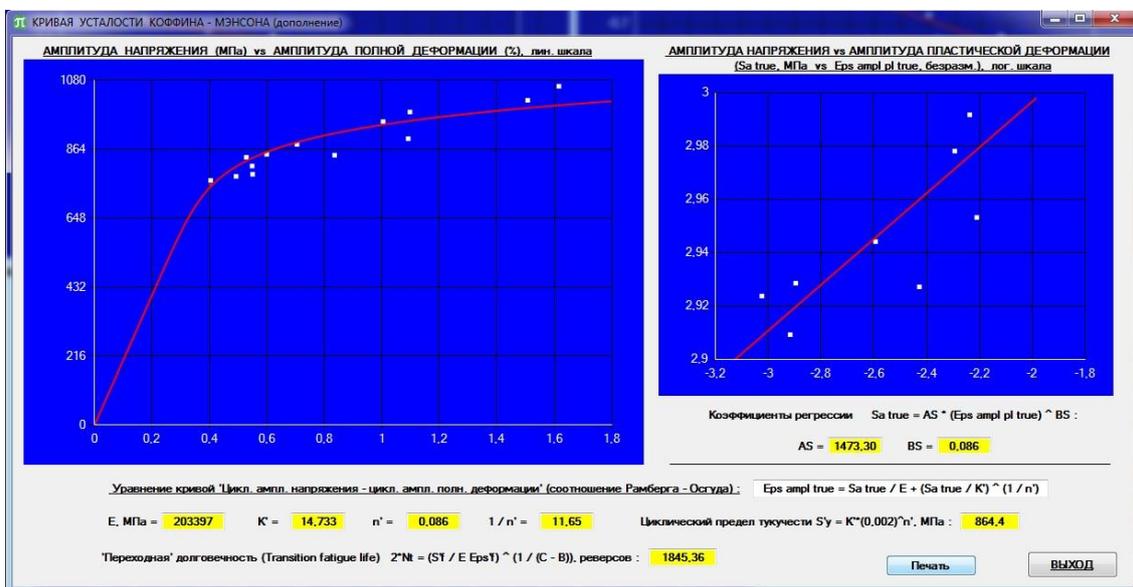


Рис. 8. К оценке циклического предела текучести сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

В соответствии с этой оценкой, циклический предел текучести сплава составляет $\sigma'_y = 864$ МПа (как указано выше, статический предел текучести определен в результате непосредственных испытаний $R_{p02} = 904$ МПа), что согласуется с уровнем амплитуды напряжения, при которой начинается значимый процесс циклической ползучести при симметричном нагружении (рис 7).

4. Заключение

В результате анализа экспериментальных данных испытаний на малоцикловую усталость при симметричном мягком нагружении сплава ХН45МВТЮБР-ИД предложен инженерный способ определения предельной деформации циклической ползучести, обычно остающейся за рамками

рассмотрения малоциклового усталости при симметричном мягком нагружении.

Установлено, что практически значимый учет циклической ползучести при симметричных мягких нагружениях наступает по достижению амплитудой напряжений уровня циклического предела текучести σ'_Y , введенный в рассмотрение параметр «средней» скорости циклической ползучести ν_{cr} избавляет от трудоемких вычислений и оказывается эффективным для оценки предельных пластических деформаций $\varepsilon_{p,f}$ в указанных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
- [2] ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.
- [3] ASTM E 468 – 2004 «Standard practice for presentation of constant fatigue test results for metallic materials».
- [4] ASTM E 606 – 92 «Standard practice for strain-controlled fatigue testing».
- [5] Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. Машиностроение, 1977. – 232 с.
- [6] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. – М. «Машиностроение», 1985 – 224 с.
- [7] Петин С.В. Эксплуатационная прочность и надежность конструкций. Ч.1 и Ч.2. – Изд. СПб Политехн. ун-та, 2012, – 137 с.
- [8] Ерасов В.С. Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний. // Авиационные материалы и технологии. 2020, № 4 (61). С. 59 – 70.
- [9] Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. – 254 с.
- [10] Р 50-54-35-88. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на ползучесть при регулярном многоцикловом нагружении. – М.: ВНИИНМАШ, 1988. – 23 с.
- [11] Low Cycle Fatigue (LCF3) Software. INSTRON Software Reference Manual. M22-15025-EN Revision B. – 152 p.
- [12] Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Уч. Пособие. – Новосибирск, изд-во НГТУ, 2010. – 61 с.
- [13] Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография / В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. –177 с.

CYCLIC CREEP OF XH45MBTЮБР-ИД ALLOY AT SYMMETRICAL LOW CYCLE FATIGUE UNDER LOAD CONTROL

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Based on the results for cylindrical specimens low cycle symmetrical load-controlled fatigue tests, the behavior of XH45MBTЮБР-ИД alloy cyclic creep at room temperature was investigated. The boundary for the beginning of cyclic creep under symmetric loading has been established. A simplified method for assessing cyclic creep limit strain, convenient for technical applications, is proposed.

Key words: low-cycle fatigue, constant symmetrical load-controlled fatigue, cyclic creep, simplified assessment of the rate of cyclic creep.

REFERENCES

- [1] GOST 25.502-79. "Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue tests".
- [2] GOST 25.504-82. "Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation".
- [3] ASTM E 468 – 2004 "Standard practice for presentation of constant fatigue test results for metallic materials".
- [4] ASTM E 606 – 92 "Standard practice for strain-controlled fatigue testing".
- [5] Kogaev V.P. Strength calculations at stresses variable in time. – M.: "Machinostroenie", 1977. – 232 p.
- [6] Kogaev V.P, Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Machine parts and structures strength and durability calculation. Handbook. – M. "Machinostroenie", 1985. – 224 p.
- [7] Petinov S.V. Operational strength and reliability of structures. Part 1 and Part 2. – Ed. St. Petersburg Polytechnic University, 2012, – 137 p.
- [8] Erasov V.S. Oreshko E.I. Fatigue testing of metallic materials (review). Part 1. Basic definitions, loading parameters, presentation of test results. // Aviation materials and technologies. 2020, No. 4 (61). pp. 59 – 70.
- [9] Terentyev V.F. Fatigue of metal materials. M.: Nauka, 2003. –254 p.
- [10] P 50-54-35-88. Calculations and strength tests. Test methods for creep under regular high-cycle loading. – M.: VNIINMASH, 1988. – 23 p.
- [11] Low Cycle Fatigue (LCF3) Software. INSTRON Software Reference Manual. M22-15025-EN Revision B. – 152 p.

- [12] Terentyev V.F., Oksogoev A.A. Cyclic strength of metallic materials: Textbook. – Novosibirsk, NSTU publishing house, 2010. – 61 p.
- [13] Mylnikov V.V. Cyclic strength and durability of structural materials: monograph / V.V. Mylnikov, O.B. Kondrashkin, D.I. Shetulov; Nizhegor. state architecture-builds univ. – N. Novgorod: NNGASU, 2018. – 177 p.