

Усталостное разрушение сплава ВНС-25

Т. Ю. Яковлева, Л. Е. Матохнюк

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

Приведены результаты экспериментального исследования влияния частоты нагружения в диапазоне 20 Гц ... 10 кГц и асимметрии циклов на трещиностойкость сплава ВНС-25. Показано, что с ростом частоты циклов скорость роста трещины монотонно снижается, а пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_{th} увеличиваются, что обусловлено незавершенностью процессов пластического деформирования при высоких частотах нагружения и повышением роли механизмов разрушения, способствующих увеличению энергоемкости процессов роста усталостной трещины. Сопоставление частотных зависимостей величин ΔK_{th} , пределов выносливости гладких образцов и образцов с концентратором напряжений показывает, что в относительных координатах они описываются единым соотношением. Это позволяет количественно оценивать влияние скорости циклического деформирования на указанные характеристики материала на основании одного вида испытаний. Установлено, что значения ΔK_{th} при асимметричных циклах нагружения связаны с ΔK_{th} при симметричных циклах и с коэффициентом чувствительности материала к статической составляющей, а также линейно зависят от коэффициента асимметрии циклов.

Ключевые слова: усталостное разрушение, циклическая трещиностойкость, частота нагружения, асимметрия циклов, фрактограмма.

Введение. Решение задачи обеспечения безотказной работы деталей машин, подвергающихся интенсивным переменным нагрузкам, требует знания параметров циклической трещиностойкости материала при различных характеристиках циклов нагружения, основными из которых являются амплитуда, частота и асимметрия.

Исследования циклической трещиностойкости сплава ВНС-25 проводили при симметричных циклах нагружения в диапазоне частот 20...10000 Гц и асимметричных циклах с частотой 170 Гц. Такой диапазон частот охватывает спектр нагрузок, наиболее часто встречающихся в практике эксплуатации деталей из данного сплава, и позволяет проследить изменение характеристик сопротивления усталостному разрушению с увеличением скорости циклического деформирования, что важно для создания моделей разрушения, учитывающих влияние указанных факторов.

Материал и методика исследований. Сплав ВНС-25 (03Х12Н10МТ) относится к нержавеющей мартенситностареющим сталям, основными легирующими элементами которого являются никель и хром [1]. Для изготовления образцов использовали сплав со следующими механическими характеристиками: $\sigma_b = 1043$ МПа; $\sigma_{0,2} = 903$ МПа; $\delta = 16,5\%$; $\psi = 68,8\%$.

Заготовки образцов для испытаний на циклическую трещиностойкость вырезали из листового проката толщиной 35 мм таким образом, чтобы направление прокатки совпадало с продольной осью образца.

Объектом испытаний служили образцы с прямоугольным сечением рабочей части размером 24×6 мм, имеющие центральную начальную тре-

щину. Такая геометрия образцов позволяла получить распространение усталостной трещины в условиях плоской деформации.

Испытания образцов проводили при симметричных циклах нагружения с частотами 20, 170, 600, 3000 и 10000 Гц. Частоту 20 Гц обеспечивали при использовании электрогидравлической машины “Шенк”, 170 Гц – машины с электромагнитным возбудителем колебаний “Виброфор”, 600 Гц – машины на базе электродинамического вибростенда, 3000 и 10000 Гц – магнито-стрикционных испытательных установок. Все машины для испытаний на частотах от 170 Гц до 10 кГц были оборудованы устройствами, поддерживающими автоколебательный режим и заданную величину коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Длину трещины при испытаниях на резонансных установках определяли посредством измерения раскрытия трещины. Методики испытаний на установках с резонансным возбуждением колебаний и расчета величины ΔK изложены в работе [2]. При испытаниях образцов на частоте 20 Гц длину трещины определяли с помощью оптического микроскопа с погрешностью не более 50 мкм, расчет величины ΔK выполняли по методике, изложенной в [3]. Испытания при асимметричных циклах нагружения проводили с частотой нагружения 170 Гц.

Как правило, образцы испытывали при постоянном значении ΔK . Однако для исследования характеристик трещиностойкости сплава вблизи пороговых значений ΔK_{th} применяли режим ступенчатого снижения уровней нагрузки: при первой возможности фиксации роста усталостной трещины амплитуду нагрузки снижали с шагом, составляющим примерно 5% предыдущего уровня. Амплитуда нагрузки, при которой после $N = 10^7$ цикл невозможно было обнаружить прирост трещины, регистрировалась как амплитуда порогового значения ΔK_{th} .

Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость. При изучении влияния частоты нагружения на циклическую трещиностойкость сплава основное внимание уделялось участкам кинетических диаграмм усталостного разрушения, соответствующим скорости роста трещины ниже 10^{-7} м/цикл.

Результаты испытаний при симметричных циклах нагружения в виде кинетических диаграмм усталостного разрушения приведены на рис. 1. Видно, что с повышением частоты нагружения скорость роста трещины при одинаковых значениях ΔK монотонно убывает, и диаграммы усталостного разрушения смещаются в область меньших скоростей, причем форма диаграмм сохраняется, они располагаются практически эквидистантно относительно друг друга.

Проводились также эксперименты с целью установления влияния асимметрии циклов нагружения на скорость роста усталостной трещины в данном сплаве. При этом частота нагружения составляла 170 Гц, коэффициенты асимметрии R : –1; 0,1; 0,3; 0,5 и 0,7. Результаты испытаний приведены на рис. 2. С увеличением значения R повышается скорость роста усталостной трещины и снижается пороговый коэффициент интенсивности напряжений. В исследуемом интервале изменения R кинетические диаграммы усталостного разрушения располагаются единообразно со смещением, обусловленным увеличением среднего напряжения цикла.

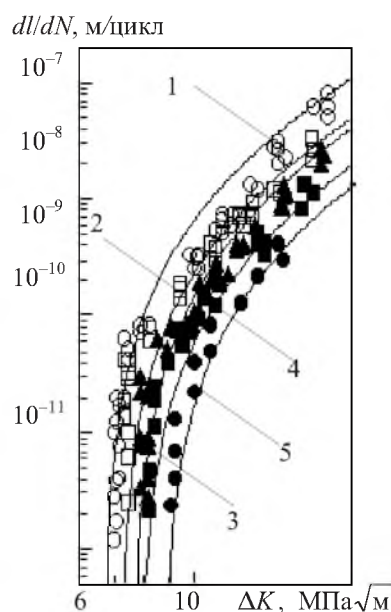


Рис. 1

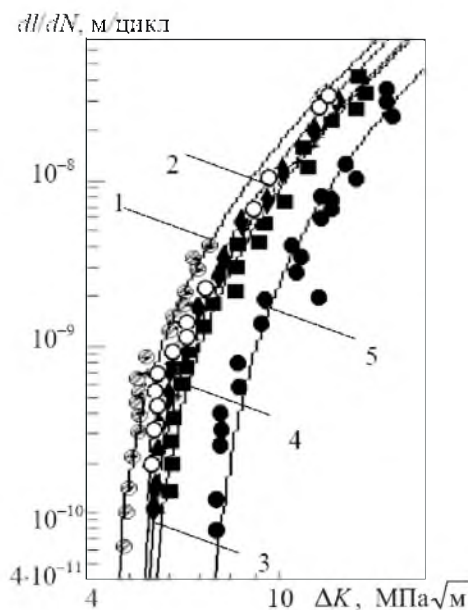


Рис. 2

Рис. 1. Кинетические диаграммы усталостного разрушения сплава ВНС-25 при $R = -1$: 1 – $f = 20$ Гц; 2 – $f = 170$ Гц; 3 – $f = 600$ Гц; 4 – $f = 3$ кГц; 5 – $f = 10$ кГц.

Рис. 2. Кинетические диаграммы усталостного разрушения сплава ВНС-25 при $f = 170$ Гц: 1 – $R = 0,7$; 2 – $R = 0,5$; 3 – $R = 0,3$; 4 – $R = 0,1$; 5 – $R = -1$.

Результаты фрактографических исследований. В монографии [4] проведена классификация и выделены три группы материалов с точки зрения строения поверхности усталостных изломов: 1) образующие усталостные бороздки на большой площади излома в процессе роста усталостной трещины; 2) фрагментально образующие усталостные бороздки на отдельных участках излома; 3) не образующие усталостные бороздки при усталостном разрушении.

Сплав ВНС-25 входит в третью группу материалов. Разрушение по структурным составляющим (рис. 3, 4) характерно для этого сплава во всем исследуемом диапазоне значений коэффициента асимметрии цикла и частоты нагружения.

Для стадии I роста усталостной трещины с преобладанием сдвигового механизма характерно наличие участков разрушения с элементами строчечности (рис. 3,а и 4,а). Формирование строчечности связано с локальным разрушением от очагов в виде выделений вторичных фаз (рис. 3,а), от которых по механизму туннелирования происходит развитие микротрещин. Механизм туннелирования предполагает неравномерное опережающее продвижение отдельных участков фронта трещины – “микротуннелей”, после чего происходит соединение последних путем сдвига [4]. Трещины в “туннелях” прорастают на значительную глубину, а участки их образования могут располагаться на большом расстоянии друг от друга. Соединение туннелей обусловлено развитием трещины в результате сдвига или отрыва в направлении, которое расположено под тем или иным углом к магистральной

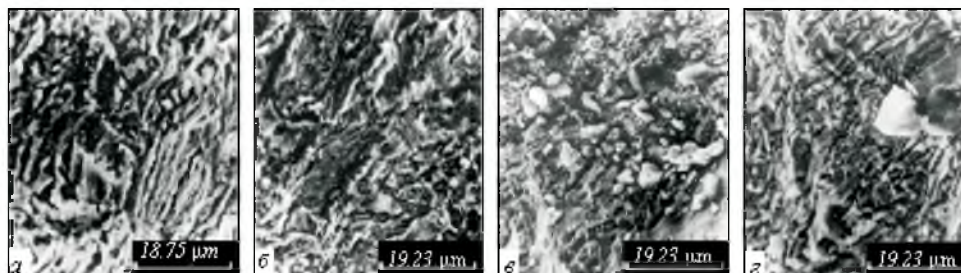


Рис. 3. Микрофрактограммы образцов из сплава ВНС-25 после испытаний при $R = -1$: а – $f = 170$ Гц, $\Delta K = 7,8$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 3,75 \cdot 10^{-10}$ м/цикл; б – $f = 3$ кГц, $\Delta K = 9,55$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 8,125 \cdot 10^{-10}$ м/цикл; в – $f = 3$ кГц, $\Delta K = 10,99$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 1,1 \cdot 10^{-9}$ м/цикл; г – $f = 3$ кГц, $\Delta K = 11,47$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 7,5 \cdot 10^{-9}$ м/цикл.

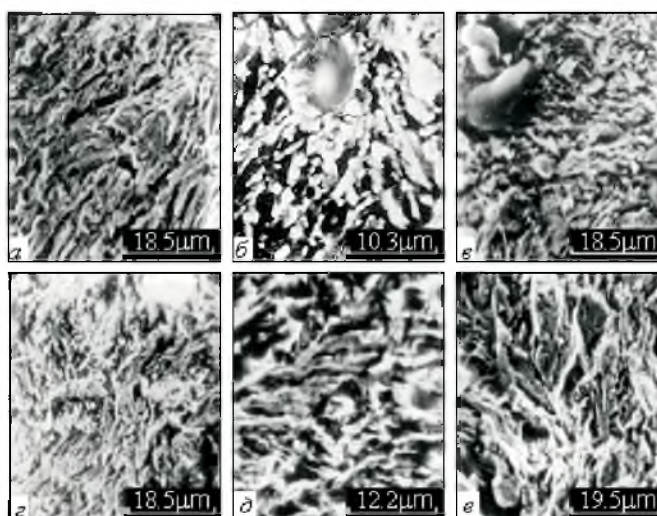


Рис. 4. Микрофрактограммы образцов из сплава ВНС-25 после испытаний при $f = 170$ Гц: а – $R = 0,1$, $\Delta K = 8,1$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 7,3 \cdot 10^{-10}$ м/цикл; б – $R = 0,3$, $\Delta K = 10,5$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 3,28 \cdot 10^{-9}$ м/цикл; в – $R = 0,5$, $\Delta K = 5,9$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 9,25 \cdot 10^{-11}$ м/цикл; г – $R = 0,5$, $\Delta K = 8,49$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 3,3 \cdot 10^{-9}$ м/цикл; д – $R = 0,7$, $\Delta K = 3,52$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 4,17 \cdot 10^{-11}$ м/цикл; е – $R = 0,7$, $\Delta K = 5,74$ МПа $\sqrt{м}$, $dl/dN = 1,5 \cdot 10^{-9}$ м/цикл.

трещине. На поверхности излома в этом случае наблюдаются элементы рельефа, соответствующие развитию трещины по структурным составляющим.

Переход от стадии I к стадии II роста усталостной трещины, характеризующейся преобладанием механизма отрыва, происходит при различных значениях ΔK , зависящих от частоты и величины коэффициента асимметрии. Общим для стадии II является образование элементов межзеренного разрушения (рис. 3,б) и наличие сферических частиц разных размеров на поверхности разрушения (рис. 4,б,г).

Рост величин ΔK и dl/dN сопровождается увеличением количества мелких сферических частиц (рис. 3,б) и появлением крупных включений, имеющих неправильную или близкую к многогранникам форму, которые свободно лежат на поверхности излома без видимых следов контакта с ней

(рис. 3,г и 4,в,д). Во многих случаях недалеко от свободно расположенных частиц видны пустые лунки, размеры и форма которых близки к этим частицам и поэтому возможно были заняты ими. Формирование вышеуказанных фрактографических особенностей усталостного разрушения сплава ВНС-25 может быть обусловлено несколькими причинами. Свободно лежащие частицы в форме многогранников, по-видимому, представляют собой выделения вторичных фаз [5], которые в результате контактного взаимодействия берегов трещины в некоторых случаях оказались смещенными относительно первоначального положения. Эти частицы являются одним из источников анизотропии стеснения деформации вдоль контура трещины. Создавая максимальное стеснение пластической деформации по отношению к соседним микрообъемам материала, они в то же время препятствуют прохождению через них фронта трещины, поскольку обладают большей прочностью, чем основной материал. В результате фронт трещины дробится, и создаются условия для микротуннелирования.

Сопоставление фрактограмм, полученных после испытаний с частотой 170 Гц и 3 кГц в условиях симметричного нагружения, показало, что повышение частоты нагружения сопровождается интенсификацией процессов дробления частиц вторичных фаз и микрорастрескивания. Оба фактора значительно повышают энергоемкость процесса разрушения, что приводит к снижению скорости развития трещины.

При увеличении коэффициента асимметрии циклов нагружения имеет место обратное явление: трещина беспрепятственно распространяется вдоль границ раздела частиц вторичных фаз и матрицы (рис. 4,в,д,е). Наблюдаются элементы разрушения за счет вскрытия полостей, образованных включениями (рис. 4,е). Появление указанных механизмов разрушения обусловлено ростом среднего напряжения цикла при увеличении коэффициента асимметрии.

Обсуждение результатов исследований. Независимо от характера нагружения разрушение является результатом необратимых структурных изменений, приводящих к исчерпанию способности материала к дальнейшей пластической деформации. С этой точки зрения кинетические диаграммы усталостного разрушения и кривые усталости отражают две взаимосвязанные стадии единого процесса – усталостного разрушения.

С повышением частоты нагружения предел выносливости сплава ВНС-25, как и других металлических материалов, увеличивается [6, 7]. Это обусловлено тем, что величина пластической деформации в процессе каждого цикла приложения нагрузки при высоких частотах меньше, чем при низких, поскольку за цикл она не успевает произойти в той мере, в какой это возможно при низкочастотном деформировании из-за малого времени пребывания материала под максимальной нагрузкой. Такое утверждение относится также к периоду развития усталостной трещины. Экспериментально установлено, что глубина зоны пластической деформации под поверхностью разрушения образцов из сплава ВНС-25 с повышением частоты нагружения монотонно уменьшается [8]. Кроме того, результаты электронно-микроскопических исследований металлов после испытаний на усталость в широком диапазоне частот нагружения [9–12] и фрактографические исследования

поверхностей образцов в том же диапазоне частот [2] показали, что при сохранении общих закономерностей накопления усталостных повреждений и разрушения с повышением частоты нагружения появляются механизмы, способствующие увеличению энергоемкости процессов. Это подтверждается приведенными выше данными.

Закономерность изменения значений пороговых коэффициентов интенсивности напряжений для сплава ВНС-25 на одинаковой базе испытаний с различными частотами нагружения f может быть описана выражением

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^H + Af^{0,5}, \quad (1)$$

где ΔK_{th}^H – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при частоте нагружения, стремящейся к нулю; A – параметр. Ранее [6] приведены результаты усталостных испытаний сплава ВНС-25 при осевом растяжении–сжатии гладких образцов и образцов с концентратором напряжений в диапазоне частот 200...10000 Гц. База испытаний составляла $2 \cdot 10^7$ цикл. Диапазон частот и база испытаний практически соответствовали таковым при испытаниях на циклическую трещиностойкость в случае определения пороговых значений ΔK_{th} . Частотные зависимости пределов выносливости таких образцов описываются аналогичным (1) выражением

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^H + Bf^{0,5}, \quad (2)$$

где смысл параметров σ_{-1}^H и B тот же, что и в уравнении (1). Если все члены в соотношениях (1) и (2) разделить на ΔK_{th}^H и σ_{-1}^H соответственно, то они будут иметь одинаковый вид

$$\omega = 1 + \beta f^{0,5}. \quad (3)$$

Сопоставим результаты испытаний сплава ВНС-25 на усталость [6] и циклическую трещиностойкость, полученные в одном диапазоне частот. Испытания [6] проводили при осевом нагружении гладких цилиндрических образцов и образцов с концентратором напряжений в виде кольцевой выточки. Величины пределов выносливости на одинаковой базе испытаний ($2 \cdot 10^7$ цикл) и пороговых коэффициентов интенсивности напряжений на базе, сопоставимой с базой усталостных испытаний, представлены в таблице.

Величину параметра β , входящего в соотношение (3), рассчитывали по значениям характеристик сопротивления усталости и циклической трещиностойкости на минимальных и максимальных частотах нагружения. Для всех видов испытаний получено $\beta = (3,31 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$. Значит, частота действующей нагрузки оказывает одинаковое количественное влияние на характеристики сопротивления усталости и циклической трещиностойкости, т.е. на обе стадии усталостного разрушения – инкубационный период и период активного роста усталостной трещины. Представление о разбросе экспери-

ментальных данных относительно кривой, построенной по соотношению (3), дает рис. 5. Как видно, разброс не превышает $\pm 5\%$, что находится в пределах погрешности измерений напряжений при усталостных испытаниях.

**Значения пределов выносливости
и пороговых коэффициентов интенсивности напряжений сплава ВНС-25**

f , Гц	σ_{-1} , МПа		ΔK_{th} , МПа $\sqrt{м}$
	гладких образцов	образцов с концентратором	
20	–	–	6,9
35	268	–	–
170	–	–	7,5
200	275	195	–
600	–	201	7,9
3000	32	228	8,5
10000	350	247	9,1

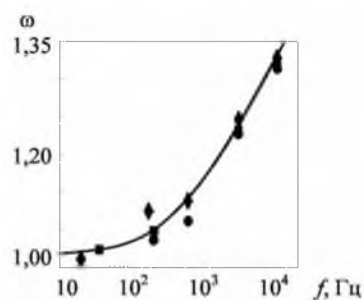


Рис. 5

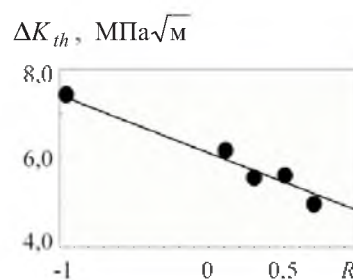


Рис. 6

Рис. 5. Частотные зависимости относительных значений пределов выносливости гладких образцов (■) и образцов с концентратором напряжений (●), а также пороговых коэффициентов интенсивности напряжений (◆).

Рис. 6. Зависимость величины коэффициента интенсивности напряжений от коэффициента асимметрии для $dl/dN = 2 \cdot 10^{-10}$ м/цикл.

Таким образом, зная зависимость характеристик усталостного разрушения от частоты нагружения при одном из видов испытаний, например пределов выносливости гладких образцов при симметричных циклах нагружения, можно количественно оценить, как будет влиять скорость циклического деформирования на величину пороговых коэффициентов интенсивности напряжений.

В условиях асимметричного нагружения коэффициент интенсивности напряжений может быть представлен через значение ΔK , соответствующее условиям симметричного нагружения ΔK_{-1} , величину коэффициента чувствительности материала к статической составляющей нагрузки K_R и коэффициент асимметрии R :

$$\Delta K = \left(1 - K_R \frac{1+R}{2}\right) \Delta K_{-1}. \quad (4)$$

Это соотношение справедливо также для пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} и хорошо соответствует полученным экспериментальным данным (рис. 6) при скорости роста трещины $2 \cdot 10^{-10}$ м/цикл, взятым из рис. 2.

Заключение. Экспериментальные исследования влияния частоты нагружения в диапазоне 20...10000 Гц на циклическую трещиностойкость сплава ВНС-25 показали, что с увеличением частоты циклов скорость роста трещины монотонно снижается, а пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений увеличиваются. Это обусловлено незавершенностью процессов пластического деформирования при высоких частотах нагружения и повышением роли механизмов разрушения, способствующих увеличению энергоемкости процессов роста усталостной трещины.

Сопоставление величин пороговых коэффициентов интенсивности напряжений с пределами выносливости гладких образцов и образцов с концентратором напряжений в зависимости от частоты нагружения показывает, что в относительных координатах они описываются единым соотношением. Это позволяет количественно оценивать влияние скорости циклического деформирования на указанные характеристики материала на основании одного вида испытаний, например на усталость гладких образцов.

Резюме

Наведено результати експериментального дослідження впливу частоти навантаження у діапазоні 20 Гц ... 10 кГц та асиметрії циклів на тріщиностійкість сплаву ВНС-25. Показано, що зі збільшенням частоти циклів швидкість росту тріщини монотонно знижується, а порогові значення коефіцієнтів інтенсивності напруження ΔK_{th} зростають, що зумовлено незавершеністю процесів пластичного деформування при високих частотах навантаження та підвищенням ролі механізмів руйнування, які сприяють збільшенню енергоемності процесів росту тріщини від утомленості. Зіставлення частотних залежностей величин ΔK_{th} , границь витривалості гладких зразків та зразків із концентратором напружень свідчить, що у відносних координатах вони описуються єдиним співвідношенням. Це дозволяє кількісно оцінювати вплив швидкості циклічного деформування на вказані характеристики матеріалу на основі одного виду випробувань. Установлено, що значення ΔK_{th} при асиметричних циклах навантаження пов'язані з ΔK_{th} при симетричних циклах та з коефіцієнтом чутливості матеріалу до статичної складової, а також лінійно залежать від коефіцієнта асиметрії циклів.

1. Солнцев Ю. П., Степанов Г. А. Конструкционные стали и сплавы для низких температур. – М: Металлургия, 1985. – 271 с.
2. Матохнюк Л. Е., Яковлева Т. Ю. Усталостное разрушение сплава АМг6Н при звуковых частотах нагружения // Пробл. прочности. – 1999. – № 2. – С. 94 – 105.

3. *Методические рекомендации МР-95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении.* – М.: Междунар. ин-т безопасности сложных технических систем, 1995. – С. 83 – 180.
4. *Иванова В. С., Шаняевский А. Л. Количественная фрактография. Усталостное разрушение.* – Челябинск: Metallurgia, 1988. – 400 с.
5. *Перкас М. Д., Кордонский В. М. Высокопрочные мартенситностареющие сплавы.* – М.: Metallurgia, 1970. – 224 с.
6. *Войналович А. В., Кофто Д. Г., Матохнюк Л. Е., Хляпов А. А. Влияние асимметрии цикла нагружения на сопротивление усталости сплавов ЭП202 и ВНС-25 при различных частотах нагружения // Пробл. прочности.* – 1990. – № 8. – С. 84 – 89.
7. *Матохнюк Л. Е. Влияние частоты нагружения на характеристики усталостного разрушения металлов // Механическая усталость металлов: Тр. 11-го Междунар. коллоквиума (Киев, 15–17 мая 1991).* – Киев, 1992. – Т. 1. – С. 240 – 247.
8. *Яковлева Т. Ю., Матохнюк Л. Е. Влияние скорости циклического нагружения на глубину зоны пластической деформации сплава ВНС-25 // Пробл. прочности.* – 2002. – № 2. – С. 62 – 65.
9. *Матохнюк Л. Е., Яковлева Т. Ю. Влияние частоты нагружения на закономерности и микромеханизмы роста усталостных трещин в титановых сплавах. Сообщ. 2 // Там же.* – 1988. – № 1. – С. 21 – 31.
10. *Яковлева Т. Ю. Дислокационная структура зоны пластической деформации и микромеханизмы усталостного разрушения титанового сплава ВТ22 // Там же.* – 2001. – № 5. – С. 62 – 65.
11. *Яковлева Т. Ю. Взаимосвязь микромеханизмов структурной перестройки титанового сплава ВТ18У в процессе усталостного разрушения // Там же.* – 2000. – № 4. – С. 33 – 44.
12. *Яковлева Т. Ю. Дислокационная структура титанового сплава ВТ22 в условиях циклического нагружения с различными частотами // Там же.* – № 6. – С. 73 – 83.

Поступила 29. 12. 2002