

620.178.3:620.194.8

## СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТОЖЖЕННОЙ И УПРОЧНЕННОЙ ЛАТУНИ Л63

Пачурин Г.В.

ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru

Повышение надежности и безопасной работы деталей машин и технических устройств, испытывающих воздействие циклических нагрузок на воздухе при разных температурах является приоритетным направлением современной науки и важнейшей задачей промышленности. Для изготовления широкого класса деталей электронной техники, радиоаппаратуры, теплообменных аппаратов и других отраслей промышленности используется латунь Л63. Их надежность в работе чаще всего определяется сопротивлением усталости. В связи с этим задача установления закономерностей усталостного разрушения с целью повышения эксплуатационной долговечности деформационно-упрочненных металлических материалов, а, следовательно, и снижения материалоемкости изделий, является весьма актуальной. В работе исследовались цилиндрические образцы корсетной формы из широко применяемой в теплообменных аппаратах, электронной технике, радиоаппаратуре, и в других отраслей промышленности используется латунь Л63. Показано, что в области температур испытания латунных Л63 образцов от 0,06 до 0,6 Тпл, К наблюдается три стадии процесса усталостного разрушения, существенно отличные для отожженных и пластически упрочненных латунных образцов. Понижение циклической долговечности в результате предварительной технологической обработки, повышения температуры испытания или амплитуды приложенного напряжения обусловлено сокращением периода до зарождения усталостных трещин и увеличением скорости их последующего развития.

**Ключевые слова:** латунь Л63, температура, упрочнение, повреждаемость, фрактография, микроструктура, циклическая долговечность, сопротивление усталости.

## FATIGUE RESISTANCE OF ANNEALED AT DIFFERENT TEMPERATURES AND STRENGTHENING BRASS L63

Pachurin G.V.

FGBOU VPO Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,  
e-mail: PachurinGV@mail.ru

Improving the reliability and safe operation of machine parts and technical devices experiencing effects of cyclic loading in air at different temperatures is a priority of modern science and the most important task of the industry. For the manufacture of a wide class of items of electronic equipment, radio equipment, heat exchangers and other industries used brass L63. Their reliability in the most determined resistance to fatigue. In connection with this problem of setting patterns of fatigue failure in order to increase the operational life of the strain-hardened metal material, and therefore, reducing materials and products is very important. We investigated samples of cylindrical shape of the corset is widely used in heat exchangers, electronics, radios, and other industries used brass L63. It is shown that in the temperature range of brass L63 test samples from 0.06 to 0.6 Tm, K a three stage process of fatigue failure, significantly different for annealed and toughened plastic brass samples. Lowering cyclic durability in the preliminary processing, temperature rise test or amplitude of the applied voltage due to the reduction in the period up to the nucleation of fatigue cracks and increase the speed of their subsequent development.

**Keywords:** brass L63, temperature, hardening, defect, fractography, microstructure, cyclic durability, fatigue resistance.

### Введение

Повышение надежности и безопасной работы деталей машин и технических устройств, испытывающих воздействие циклических нагрузок на воздухе при разных температурах является приоритетным направлением современной науки и важнейшей задачей промышленности. Большинство разрушений инженерных конструкций носит усталостный характер, что приводит к финансовым потерям, а порой и человеческим жертвам.

Для изготовления широкого класса деталей электронной техники, радиоаппаратуры, теплообменных аппаратов и других отраслей промышленности используется латунь Л63. Их надежность в работе чаще всего

определяется сопротивлением усталости, так как разрушение изделий может произойти под действием напряжений, намного меньших, чем при статическом нагружении. При этом процесс разрушения является сложным, происходящим на разных масштабах уровнях: атомных, дислокационных, субструктурных и структурных.

Наиболее широко распространенным способом изготовления деталей считается обработка металлов давлением. В результате упрочнения сопротивление усталости деталей машин и механизмов изменяется неоднозначно, и весь резерв прочности материала исчерпывается не всегда. Однако исследования влияния вида и режима технологической обработки на сопротивление

усталостному разрушению латуни Л63 при разных температурах практически отсутствуют. Это, в том числе, объясняется трудностью проведения длительных во времени усталостных испытаний при повышенных и криогенных температурах.

В связи с этим задача установления закономерностей усталостного разрушения с целью повышения эксплуатационной долговечности деформационно-упрочненных металлических материалов, а, следовательно, и снижения материалоемкости изделий, является весьма актуальной.

### Методика проведения экспериментов

В работе исследовались цилиндрические образцы корсетной формы из широко применяемой в теплообменных аппаратах, электронной технике, радиоаппаратуре, и в других отраслей промышленности используется латунь Л63, изготовленные механической обработкой из металлических материалов в состоянии поставки (холоднокатаная, размер зерна 0,04 мм).

Отжиг проводился по режиму: нагрев до 600°C; выдержка 1 ч; охлаждение со скоростью 100°C в час. Предварительная деформация растяжением с разной степенью ( $\epsilon_{пр.д}$  % = 5, 13 и 25%) и испытания при статическом нагружении при комнатной температуре проводились на универсальной разрывной машине ZD 10/90 со скоростью деформации  $2 \times 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. При этом записывалась диаграмма растяжения, начальные и конечные размеры образцов, определялись их прочностные и пластические характеристики в состоянии поставки и после технологической обработки. Низкая температура испытания обеспечивалась криостатом, который представляет собой открытый сосуд диаметром 70 мм и высотой 190 мм. В этот сосуд заливался жидкий азот (-196°C). Образец подвергался растяжению, находясь в жидкой среде. Повышенная температура (+440°C) достигалась в разъемной электропечи с открытой спиралью. Регулировка температуры осуществлялась трансформатором типа РН0-250-10 с использованием термопары типа ХА и прибора для измерения температуры (МР-64-02, класс точности 1,5). Образец испытывался, находясь в печи, то есть в изотермических условиях [7].

Исследования сопротивления усталостному разрушению образцов при комнатной температуре проводились на машине МИП-8, переоборудованной для нагружения грузами (симметричный консольный изгиб с вращением с частотой 3000 об/мин). Для обеспечения возможности наблюдения появления и контроля роста усталостных трещин на поверхности образца, МИП-8 оснащалась фазосинхронизатором и оптическим микроскопом (увеличение 37) со стробоскопическим освещением. Для испытания на усталость при температуре жидкого азота (-196°C) машина МИП-8 оборудовалась специальной камерой [1,4], а при повышенной температуре (+440°C) – в печи сопротивления (включенной в схему автоматического контроля температурного режима). При этом в процессе циклического нагружения записывалось изменение текущего прогиба образца [5].

По результатам статических испытаний строились кривые упрочнения в координатах  $\lg \sigma_t - \lg \epsilon_t$  ( $\sigma_t$  и  $\epsilon_t$  соответственно – истинные напряжение и деформация), позволяющие определить показатель степени  $n$  в уравнении кривой ( $\sigma = \sigma_0 \times \epsilon^n$ ) деформационного упрочнения исследованных материалов в состоянии поставки и после технологической обработки, где  $\epsilon_t = \ln(1+\delta_t)$  [8,9].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

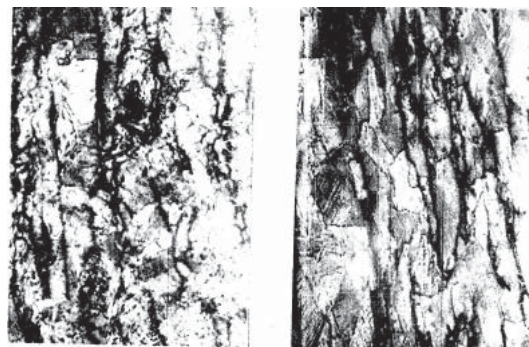
#### Механические свойства

Экспериментально установлено, что с повышением температуры испытания латуни Л63 от 0,25 до 0,6 Тпл,К величины показателей пластичности возрастают, а показатели прочности уменьшаются. По мере увеличения степени предварительного пластического деформирования образцов эта закономерность усиливается.

Для комнатной температуры с ростом степени предварительного наклепа способность материала к деформационному упрочнению при статическом нагружении снижается, особенно интенсивно в области малых степеней предварительной технологической деформаций. Кривые упрочнения материала располагаются тем выше, чем больше степень предварительной деформации [3].

В условиях криогенных температур у меди величины предела прочности и относительного удлинения существенно возрастают, а относительного сужения незначительно снижаются по сравнению с растяжением при комнатной температуре. Предварительная технологическая деформация приводит к снижению при -196°C параметров пластичности ( $\delta$  и  $\psi$ ) и повышению прочности ( $\sigma_B$ ).

У латуни Л63 отмечается крупнозернистая структура с определенной направленностью, которая сохраняется и после растяжения при температуре 440°C (рис. 1). В зернах латуни имеются двойники. Вероятно рекристаллизованные при 440°C зерна сохранили текстуру деформации.



а

б

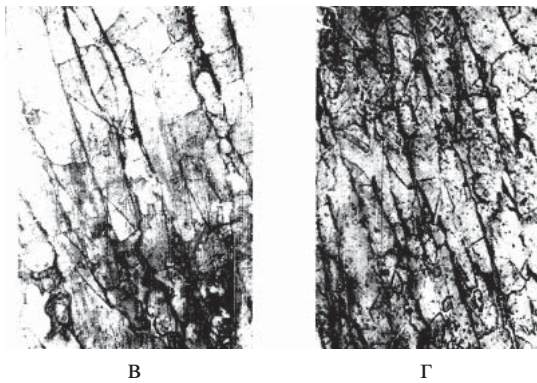


Рис. 1. Микроструктура латуни Л63 после растяжения при 20°С (а, б) и 440°С (в, г) в состояниях исходном (недеформированном) (а, в) и после предварительной деформации в области шейки образца (б, г); увеличение x170

**Циклическая долговечность**

Анализ результатов экспериментов при различных температурах показывает, что с уменьшением температуры испытания циклическая долговечность металлических материалов, как правило, увеличивается. При этом эффект степени предварительной пластической деформации на сопротивление усталостному разрушению Л63 при разных температурах зависит от структуры материала и уровня приложенного напряжения.

Для холоднокатаной латуни Л63 (рис. 2) с повышением температуры испытания от 0,065 до 0,25 Тпл, К циклическая долговечность ( $\sigma = 300$  МПа) понижается с  $2,27 \times 10^5$  до  $1,01 \times 10^5$  циклов, то есть в 1,25 раза, а при увеличении температуры от 0,25 до 0,6 Тпл, К долговечность ( $\sigma = 240$  МПа) снижается с  $3,41 \times 10^5$  до  $4,42 \times 10^4$  циклов, то есть в 7,7 раза.

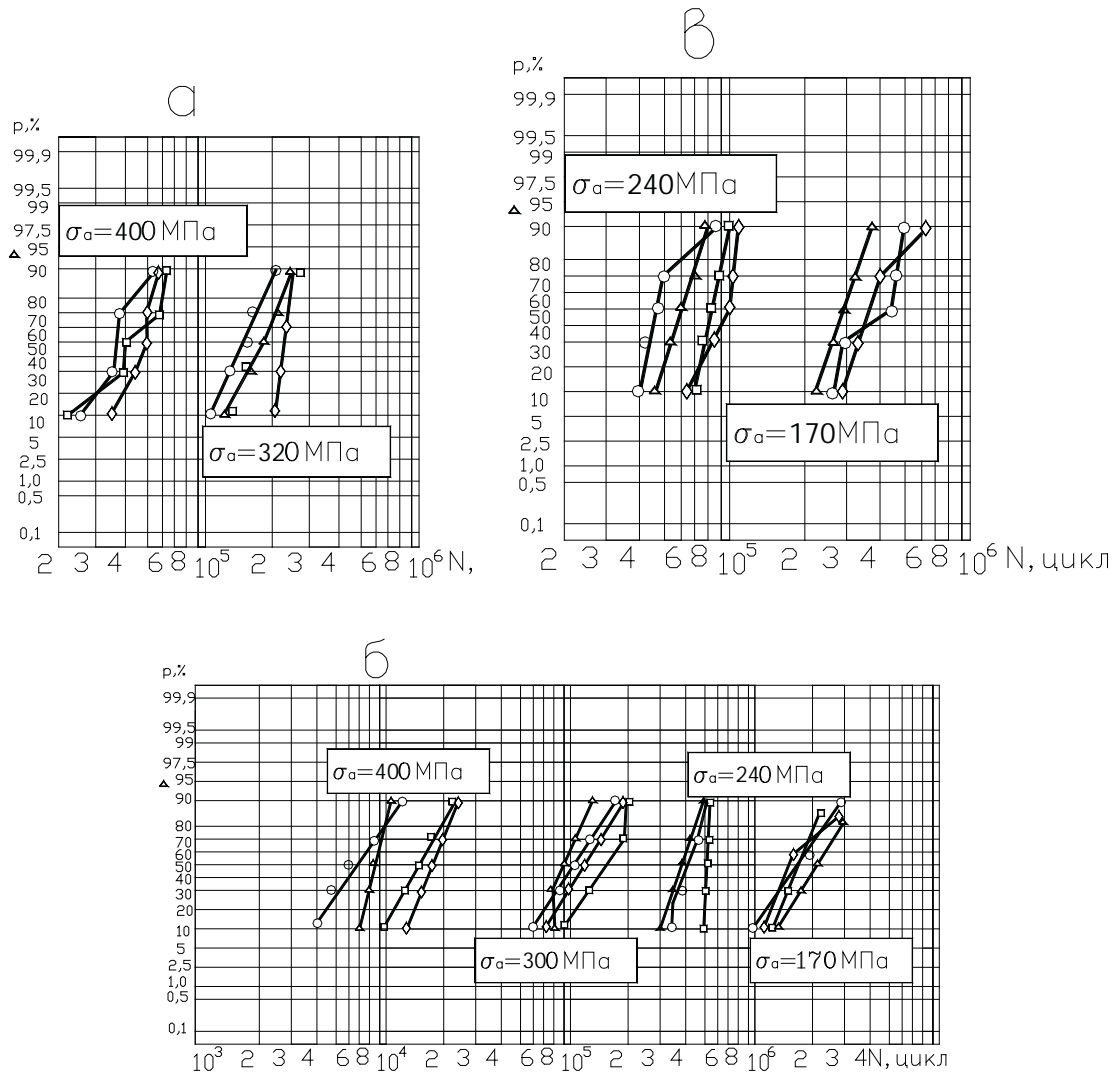


Рис. 2. Кривые распределения долговечности латуни Л63Т после растяжения ( $\epsilon_{np, \sigma}$  %):  
 ○ – 0; ▲ – 5; □ – 13; ◇ – 25. Температура испытания 0,065 (а); 0,25 (б) и 0,6 Тпл, К (в).  
 Консольный изгиб с вращением частотой 50 Гц.

При этом температурная зависимость циклической долговечности выражена сильнее при низких амплитудах напряжения. Увеличение степени предварительной деформации (5, 13 и 25%) при всех исследованных температурах приводит к возрастанию долговечности холоднокатаной латуни Л63 при высоких уровнях напряжения.

Наблюдается монотонное увеличение долговечности с  $3,7 \times 10^4$  до  $4,67 \times 10^4$  циклов ( $\sigma_a = 400$  МПа) при  $\varepsilon_{пр.д.} = 25\%$  для  $T = 0,065 T_{пл, К}$  с  $5,25 \times 10^4$  до  $1,0 \times 10^5$  циклов ( $\sigma_a = 240$  МПа) при  $\varepsilon_{пр.д.} = 25\%$  для  $T = 0,6 T_{пл, К}$  (рис.3.26-3.28).

При низких значениях амплитуды усталостных испытаний повышение долговечности с ростом степени предварительного наклепа латуни Л63 происходит менее интенсивно.

#### Кривые текущего прогиба

На рис. 3 представлены кривые изменения текущего прогиба образцов из полутвердой латуни Л63 в процессе усталостного разрушения при разных температурах после различных технологической пластической деформации.

Анализ результатов изменений прогиба образца при усталости показывает, что кри-

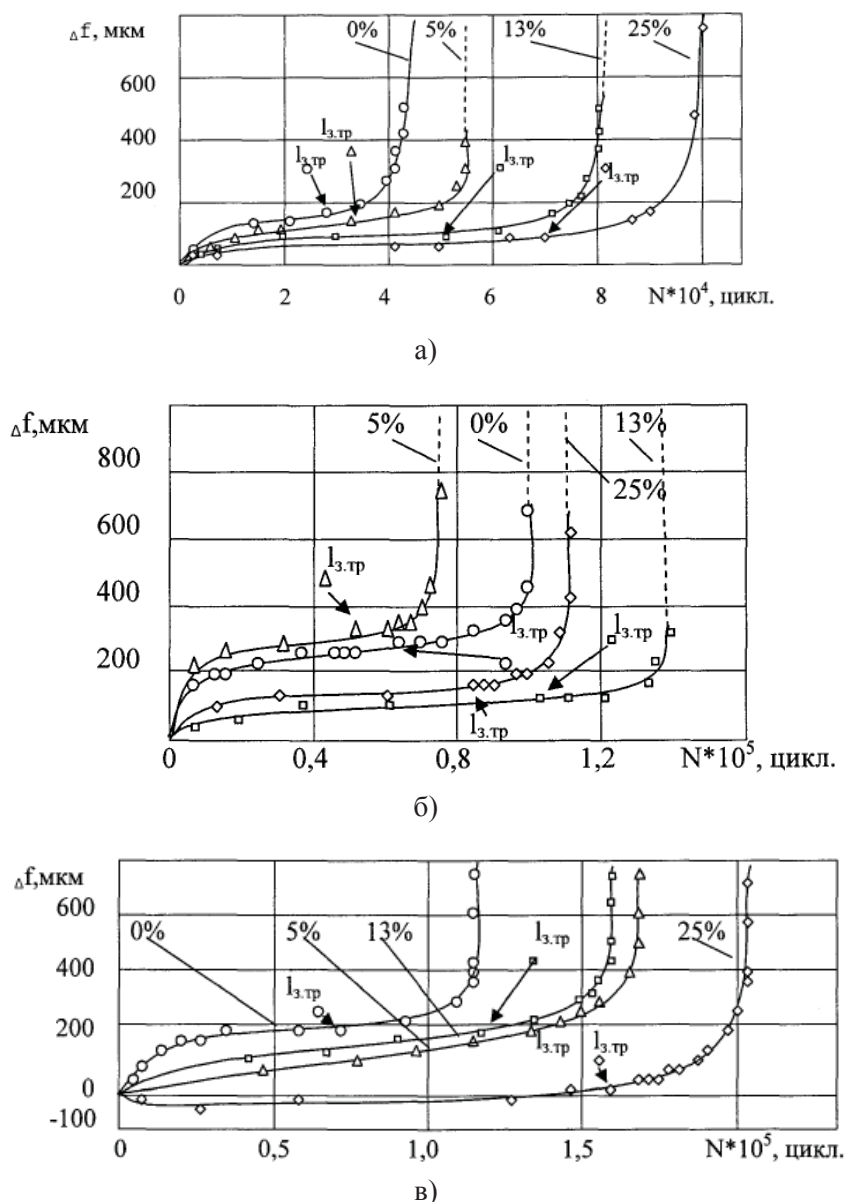


Рис. 3. Кривые изменения текущего прогиба образцов из полутвердой латуни Л63 в процессе циклического нагружения при  $\sigma_a = 240$  (а),  $300$  (б) и  $320$  МПа (в) для различных степеней предварительного растяжения: 0, 5, 13 и 25%. Температура испытания:  $+440^\circ\text{C}$  (а)  $+20^\circ\text{C}$  (б) и  $-196^\circ\text{C}$  (в)



вые имеют три участка: 1 – резкое уменьшение (для отожженных) или увеличение, (для холоднокатаных) материалов; 2 – стадия стабилизации прогиба и 3 – резкое его увеличение, связанное с катастрофическим разрушением материала. При этом увеличению прогиба образца после стадии стабилизации соответствует момент появления (из.тр.) на его поверхности макротрещины длиной ~ 1,0 мм.

**Влияние технологической обработки на структуру и сопротивление усталостному разрушению меди М1**

Уравнения кривых усталости Л63 при циклическом нагружении в условиях комнатной температуры приведены в табл. 1.

Пластическое деформирование до степеней 5, 13 и 25% латуни Л63 обуславливает увеличение ее долговечности при всех температурах испытания в области высоких амплитуд напряжений, соответствующих более 10<sup>6</sup> циклов до разрушения.

Латунь Л63 после отжига при циклическом нагружении упрочняется, но менее интенсивно, даже при более высоких амплитудах напряжения, что может обуславливаться различной величиной их энергии дефектов упаковки, которая равна 0,07 и 0,007 Дж/м<sup>2</sup> для меди и латуни, соответственно [5].

Анализ сопоставления кривых изменения текущего прогиба со структурной по-

**Таблица 1**

Уравнения кривых усталости холоднокатаной латуни Л63 при комнатной температуре испытания для разных степеней предварительной деформации

№ п/п	Материал	ε <sub>пред</sub> , %	lg σ = - tg α <sub>ω</sub> lg N + lg σ <sub>a</sub> или Y = - A X + B	r <sub>x,y</sub>
1	Л63	ИС (х/к)	Y = - 0,148 X + 3,192	0,983
2	Л63	5	Y = - 0,156 X + 3,236	0,989
3	Л63	13	Y = - 0,177 X + 3,368	0,988
4	Л63	25	Y = - 0,183 X + 3,395	0,980

Долговечность недеформированных образцов из холоднокатаной латуни с повышением температуры от -196 до +540°С снижается (рис. 4).

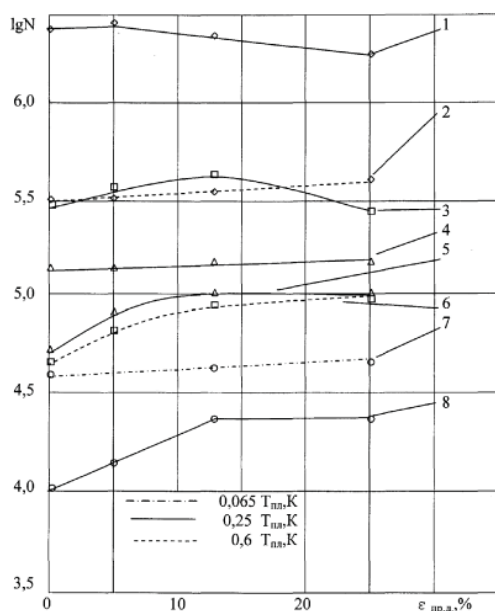


Рис. 4. Влияние степени предварительной деформации образцов из Л63Т на их долговечность при различных температурах для напряжений: 170 МПа (1,2); 240 МПа (3,6); 300 МПа (4,5); 400 МПа (7,8)

вреждаемостью поверхности образцов из отожженной латуни Л63 показал, что вначале (8,0% от N<sub>p</sub>) некоторых зернах появляются отдельные виды скольжения, отстоящие друг от друга на расстоянии ~ 10 мкм. При 26,1% от N<sub>p</sub> в некоторых зернах наблюдаются близко расположенные (от 1 до 1,5 мкм) толстые полосы скольжения по всему благоприятно ориентированному зерну. При 39,1% от N<sub>p</sub> в отдельных зернах проявляются транскристаллитные трещины, проходящие поперек полосы скольжения. При 70,0% от N<sub>p</sub> в интенсивных полосах скольжения образуются транс- и межкуристаллитные микротрещины, а при 87,3% от N<sub>p</sub> видна микротрещина, проходящая как по телу зерен, так и между ними.

У тянутой латуни Л63 в процессе циклического нагружения изменение текущего прогиба образца и микроструктуры его травленной поверхности имеют другой характер.

Вначале (3,4% от N<sub>p</sub>) в некоторых зернах появляются длинные полосы скольжения, проходящие через все зерно и отстоящие друг от друга на расстоянии ~ 8 мкм; при 6,7% от N<sub>p</sub> уменьшается расстояние между линиями скольжения, но незначительно; при 33,5% от N<sub>p</sub> линии скольжения наблюдаются почти во всех зернах опасного сечения образца; при 61,3% от N<sub>p</sub> появля-

ются близко отстоящие друг от друга (от 1,5 до 2,0 мкм) редкие полосы скольжения по вторичным плоскостям; и при 83,8% от  $N_p$  видна ломаная трещина, проходящая преимущественно по телу зерен в направлении, перпендикулярном оси образца.

При выходе на стадию стабилизации изменения прогиба образцов в латуни Л63, на границах двойников образуются микротрещины, затем перерастающие в усталостные трещины. Магистральная трещина быстро распространяется по телу и границам зерен. Холоднокатаная латунь Л63 в процессе усталости при всех температурах испытанная разупрочняется (рис. 3).

При комнатной температуре скольжение дислокаций и усталостное разрушение в ней развиваются очень медленно, а трещины распространяются преимущественно по зернам. Для холоднокатаной латуни Л63 при температурах 0,25 и 0,6 Тпл,К скорость роста усталостной трещины составляет, соответственно, 0,015 и 0,046 мкм/цикл (амплитуда 100 МПа). Изломы образцов представляют собой сравнительно гладкую поверхность, с неглубокими следами распространения трещин. Повышение ее долговечности при высоких амплитудах в результате пластической деформации на 5, 13 и 25% (рис. 4) коррелирует с возрастанием продолжительности стадии стабилизации упрочнения.

Процесс разрушения в деформированной холоднокатаной латуни Л63 развивается от очагов, обусловленных концентрацией напряжений, но усталостная трещина растет медленно, так как деформационные вакансии, образующиеся при циклическом нагружении в металле с низкой энергией дефекта упаковки [6], каким является латунь, способствуют релаксационным явлениям и частично снимают предварительный наклеп. В связи с этим, при увеличении степени деформации возрастает зона ямочного усталостного разрушения в центре латуни образца.

Число циклов до зарождения усталостной трещины в латуни Л63 при изменении температуры циклического нагружения с 0,065 Тпл,К до 0,25 Тпл,К уменьшается в 1,18 раза (с  $8 \times 10^4$  циклов до  $6,8 \times 10^4$  циклов) при  $\sigma_a = 300$  МПа и при изменении температуры испытания с 0,25 Тпл,К до 0,6 Тпл,К в 1,6 раза (с  $2,72 \times 10^5$  циклов до  $1,7 \times 10^5$  циклов) при  $\sigma_a = 170$  МПа, а скорость роста трещины возрастает с  $5,0 \times 10^{-2}$  мкм/цикл до  $1,0 \times 10^{-1}$  мкм/цикл ( $\sigma_a = 300$  МПа) при изменении температуры испытания с 0,065 Тпл,К до 0,25 Тпл,К и с  $1,5 \times 10^{-2}$  мкм/цикл до  $4,6 \times 10^{-2}$  мкм/цикл ( $\sigma_a = 170$  МПа) при изменении температуры с 0,25 Тпл,К до 0,6 Тпл,К.

Долговечность  $N_{з.тр}$  у холоднокатаной латуни Л63 при комнатной температуре значительно выше, чем у отожженной Л63, а скорость роста усталостной трещины в холоднокатаной латуни в первый период 0,030 мкм/цикл и во второй период 0,079 мкм/цикл при  $\sigma_a = 240$  МПа. Кинетические диаграммы усталостного разрушения тянутой Л63 располагаются несколько ниже и имеют большие значения порогового  $K_{th}$  и критического  $K_{fc}$  коэффициентов интенсивности напряжений, а для данного  $\Delta K$  – меньшую скорость роста усталостной трещины, чем кинетическая диаграмма усталостного разрушения (КДУР) тянутой М1. При этом магистральная трещина в тянутых образцах развивается в основном по телу зерна. Для холоднокатаной Л63  $K_{fc}$  несколько возрастает при изменении от 0 до 13% и снижается при  $\epsilon_{пр.д} = 25\%$ , что согласуется с величинами ее долговечности, представленными выше.

В области низких амплитуд приложенного напряжения максимальная долговечность холоднокатаной Л63 соответствует малым степеням предварительного растяжения, что согласуется с литературными данными. Предварительный наклеп отожженных образцов тормозит развитие процесса усталостного разрушения и повышает циклическую долговечность, что обусловливается увеличением периода до зарождения трещины и уменьшением скорости ее распространения.

Циклическая долговечность металлических материалов существенно зависит от температуры испытания, повышение которой приводит к значительному снижению долговечности, сопровождающемуся уменьшением периода до зарождения усталостной макротрещины и увеличением скорости ее последующего роста.

Таким образом, холоднокатаная латунь в процессе циклического нагружения разупрочняется при всех температурах. При комнатной температуре скольжение дислокаций происходит в ней слабо, а усталостная трещина начинает распространяться с 84% от числа циклов до полного разрушения преимущественно по телу зерен. Изломы представляют собой сравнительно гладкую поверхность с равномерно распределенной повреждаемостью материала в виде мелких чмок и ступенек, с многочисленными неглубокими следами роста трещин. Долгом также вязкий, величина его уменьшается с повышением циклической долговечности.

С увеличением степени предварительной деформации полутвердой латуни Л63 все более становится очевидным развитие

процесса усталостного разрушения от очагов, обусловленного концентрацией напряжений. Долом остается в основном вязким. Структура поверхности излома мелкодисперсная, с глубокими следами распространения трещин, что свидетельствует о наличии высокой концентрации вакансий и активном скольжении дислокаций, особенно при высоких амплитудах нагружения. Ступеньки и ямки в изломе тем крупнее, чем выше амплитуда и степень предварительной деформации.

При повышении температуры испытания до 0,6 Тпл,К активизируются релаксационные процессы [2], главным образом вакансионные, приводящие к быстрому разупрочнению материала образцов. В изломах четко выраженных следов продвижения трещины, очагов ее зарождения и зон долома не наблюдается. Снижение сопротивления усталости исследованных материалов с ростом температуры испытания связывается с повышением пластической деформации и с изменением характера ее протекания при низкотемпературном деформировании, обусловленном формированием структуры, отличной от таковой при высоких температурах.

С повышением температуры испытания до 0,6 Тпл,К сохраняется вязкий характер

остается в основном мелкодисперсной, следы развития трещин становятся более рельефными и длинными. При этом увеличивается количество неразвивающихся трещин. При степени предварительной деформации 25% долом более хрупкий, со сравнительно ровной площадкой скола.

В области низкой температуры испытания 0,065 Тпл,К долговечность холоднокатаной латуни в зависимости от степени предварительной деформации изменяется незначительно. Характер изломов образцов различается также незначительно. При  $\sigma_a = 400$  МПа и  $\sigma_c = 320$  МПа после деформации на 5; 13 и 25% изломы имеют более грубую структуру по сравнению с образцами холоднокатаной Л63 без дополнительной деформации. Однако всем им свойственно наличие четко различимых очагов зарождения трещин, обусловленных высокой концентрацией напряжений, и рельефных следов их развития. Доломы – вязкие с ямками и ступеньками, располагаются почти в центре сечения образцов.

Исследование усталостных изломов образцов показывает при всех исследованных температурах увеличение размера зоны усталостного разрушения с повышением их циклической долговечности (рис. 5).

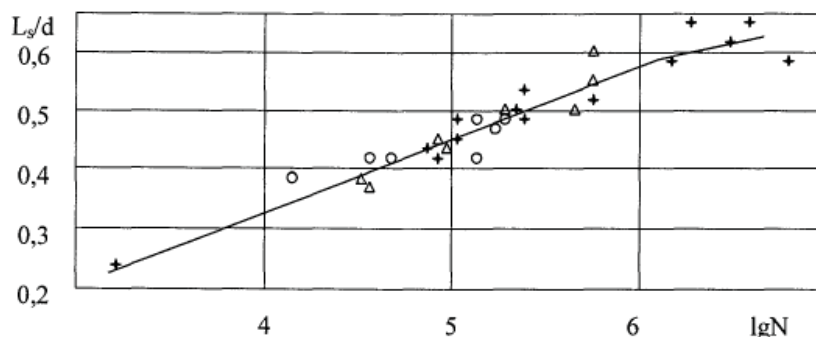


Рис. 5. Изменение относительной величины усталости зоны  $l/d$  образцов из тянутой Л63 с ростом из долговечности при температурах испытания: 0,065, 0,25 и 0,6 Тпл, К.

разрушения с ровной мелкодисперстной (особенно при более низкой амплитуде  $\sigma_a = 170$  МПа) поверхностью излома образца из холоднокатаной латуни Л63. При амплитуде  $\sigma_a = 300$  МПа ( $N = 4,97 \times 10^4$  циклов) обнаруживаются очаги зарождения большей частью не распространяющихся трещин, ямки, ступеньки и мелкие сколы. Долом вязкий и смещен к центру образца. При этом с ростом степени предварительной деформации (5; 13 и 25%) при нагружении  $\sigma_a = 240$  МПа долговечность холоднокатаной Л63 растет. Хотя структура излома

**Выводы**

1. Циклическая долговечность латуни Л63 существенно зависит от температуры испытания, повышение которой приводит к значительному снижению долговечности.
2. В области температур испытания латунных Л63 образцов от 0,06 до 0,6 Тпл,К наблюдается три стадии процесса усталостного разрушения, существенно отличные для отожженных и пластически упрочненных латунных образцов.
3. Понижение циклической долговечности в результате предварительной техноло-

гической обработки, повышения температуры испытания или амплитуды приложенного напряжения обусловлено сокращением периода до зарождения усталостных трещин и увеличением скорости их последующего развития.

#### Список литературы

1. Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. А.С. 920456 СССР. Устройство для испытаний на усталость при изгибе вращающегося образца // Открытия. Изобретения. – 1982. – №14. – С. 158.
2. Гусякова Г.П., Пачурин Г.В. Температурная зависимость сопротивления усталостному разрушению предварительно деформированных металлов // Цветная металлургия. Известия ВУЗов СССР. – 1990. – №5. – С.90-96.
3. Гушин А.Н., Пачурин Г.В. Циклическая повреждаемость и механические свойства деформированной растяжением стали 08ЮА // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №1. – С. 24-26.
4. Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. К испытанию образцов на консольный круговой изгиб при низких температурах // Заводская лаборатория. – 1981. – Т.47, №11. – С. 89-90.
5. Пачурин Г.В. Кинетика усталостного разрушения меди М1 и латуни Л63 // Цветная металлургия // Известия ВУЗов СССР. – 1989. – №1. – С.96-101.
6. Пачурин Г.В. Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – №10. – С 35-38.
7. Пачурин Г.В., Гушин А.Н., Пачурин К.Г., Пименов Г.В. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения: учеб. пособие. – Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2005. – 139 с.
8. Пачурин Г.В. и др. Микромеханизмы высокотемпературной усталости и ползучести металлов и сплавов: учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 116 с.
9. Пачурин Г.В., Власов В.А. Долговечность листовых низкоуглеродистых сталей на воздухе и в коррозионной среде // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 3 (67). – С. 125-133.