

УДК 629.7.03

## Масштабные уровни предела усталости металлов

А.А. Шанявский, А.П. Солдатенков

Авиационный регистр Российской Федерации, Аэропорт Шереметьево, а/я 54, Химкинский район,  
Московская область, 141426, Россия

Проанализирована масштабная иерархия областей переходов от сверхмногоциклового усталости металлов к много- и малоциклового усталости, которые рассматривались в качестве предела усталости металлов в соответствии с концепцией Веллера. В области перехода, которая соответствует интервалу долговечности около  $10^6$ – $10^8$  циклов нагружения, реализуется мультимодальное распределение усталостной долговечности. Рассмотрена связь напряжения  $\sigma_{-1}$ , определяемого как предела усталости металла, с механическими характеристиками  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0.2}$  для авиационных конструкционных материалов на основе Fe, Al, Mg, Ti, Cu. Выявлены зависимости  $\sigma_{-1}$  от  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0.2}$ , а также зависимость отношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  от отношения  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ . С возрастанием  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  полная диаграмма усталости металлов для трех масштабных уровней вырождается. Переход от сверхмногоциклового к малоциклового усталости происходит без области мезомасштабного уровня, отвечающей многоциклового усталости при  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \geq 1$ .

*Ключевые слова:* предел усталости, механические характеристики, авиационные конструкционные материалы, масштабные уровни

DOI 10.24411/1683-805X-2019-11005

## Scales of the fatigue limit of metals

A.A. Shanyavskiy and A.P. Soldatenkov

Aviation Register of the Russian Federation, Sheremetyevo Airport, Moscow region, 141426, Russia

Scales of transition regions from very high cycle fatigue to high and low cycle fatigue, which are usually considered as the fatigue limit for metals in accordance with the Wöhler concept, have been analyzed. In the transition region corresponding to the durability range of  $10^6$ – $10^8$ , the durability distribution is multimodal. The relationship between the stress  $\sigma_{-1}$ , conventionally defined as the fatigue limit of metal, and material characteristics  $\sigma_B$  and  $\sigma_{0.2}$  is studied for Fe, Al, Mg, Ti, and Cu based alloys for aviation applications. The dependences of  $\sigma_{-1}$  on  $\sigma_B$  and  $\sigma_{0.2}$ , as well as the dependence of  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  on  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  are discussed. It is shown that the increase in the value of  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  leads to the degradation of the complete fatigue diagram on three scale levels. Transition from very high cycle to low cycle fatigue occurs without high cycle fatigue that takes place at  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \geq 1$ .

*Keywords:* fatigue limit, mechanical characteristics, aviation structural materials, scale levels

### 1. Введение

Усталостное разрушение металлов принято характеризовать кривой Веллера в широком диапазоне напряжений и использовать простое соотношение между амплитудой напряжения  $\sigma_a$  и количеством циклов до разрушения  $N_f$  в таком виде [1]:

$$N_f \sigma_a^m = \text{const.} \quad (1)$$

Показатель степени  $m$  является характеристикой материала, зависящей от области, в которой реализовано его разрушение. Принято [1] разделять области разрушения материала по долговечности до  $10^5$  циклов, что

соответствует малоциклового усталости (МЦУ), и более  $10^5$  циклов, что соответствует области многоциклового усталости (МНЦУ).

Область многоциклового усталости ограничена долговечностью  $10^8$  циклов, т.к. в диапазоне наработок  $10^7$ – $10^8$  циклов определяется уровень напряжения, при котором не наблюдается разрушение испытываемых образцов в указанном диапазоне долговечностей [2]. Эта характеристика поведения металла рассматривается как предел выносливости или предел усталости материала и в случае нагружения в условиях симметричного цикла обозначается  $\sigma_{-1}$ .

Однако такое представление о поведении металла под действием циклической нагрузки оказалось недостаточным. Выяснилось, что в области долговечностей более  $10^8$  циклов нагружения и при напряжении менее  $\sigma_{-1}$  наблюдается разрушение образцов вплоть до долговечности  $10^{10}$  циклов нагружения, начиная с которой и далее разрушение образцов опять не наблюдают [3]. Эту область долговечности предложено называть сверхмногоциклового усталостью (СВМУ) [4–7]. Особенность разрушения металла в области сверхмногоциклового усталости связана с формированием очага разрушения под поверхностью.

Долговечность является характеристикой реакции материала на внешнее воздействие, поэтому в зависимости от вида материала для одного и того же диапазона напряжений, являющегося характеристикой внешнего воздействия, может быть получен разный диапазон долговечностей. Причем этот диапазон в зависимости от уровня прочности может соответствовать любой из указанных выше областей усталостного разрушения материала. Из этого следует, что величина  $\sigma_{-1}$  может быть границей любой из указанных выше областей усталостного разрушения.

В рамках синергетики на основе существования масштабных уровней в последовательности протекания процессов эволюции открытых систем было введено представление о бифуркационной диаграмме усталости металлов (рис. 1), которая ставит в соответствие реализуемой долговечности эквивалентный уровень напряжения, как характеристику плотности энергии деформации, накопленной в единичном объеме металла, например в зерне [8]. Переход от одной стадии разруше-

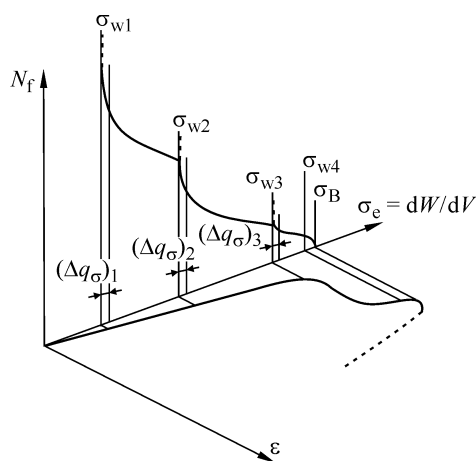


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма усталости металлов  $N_f - \sigma_e$ , построенная в соответствии с диаграммой растяжения  $\sigma_e - \epsilon$  в терминах эквивалентного уровня напряжения  $\sigma_e$  или плотности энергии деформации  $dW/dV$ . Указаны области бифуркации  $(\Delta q_\sigma)_i$  при переходах к микро- или нано- ( $\sigma_{w1} - \sigma_{w2}$ ), мезо- ( $\sigma_{w2} - \sigma_{w3}$ ) и макромасштабным ( $\sigma_{w3} - \sigma_{w4}$ ) уровням разрушения

ния к другой соответствует области бифуркации, когда при фиксированном уровне напряжения может быть реализован один или другой механизм разрушения, но с разной вероятностью. Важно подчеркнуть, что в переходной области сосуществуют два разных способа поглощения энергии, каждый из которых доминирует на своем (предыдущем или последующем) масштабном уровне, в результате чего в области перехода реализуется бимодальное распределение усталостной долговечности.

Введение представления об эквивалентном уровне напряжения и плотности энергии деформации в описание поведение металлов при циклическом нагружении привело к рассмотрению каскада усталостных кривых в таком виде:

$$N_f \sigma_e^{m_i} = C_i. \tag{2}$$

В соотношении (2) порядок  $i$  соответствует масштабному уровню: 1 — микро (или наноразмерный) уровень, отвечающий сверхмногоциклового усталости; 2 — мезомасштаб, отвечающий многоциклового усталости; 3 — макромасштабный уровень, отвечающий малоциклового усталости.

Вместе с тем для объяснения природы разрушения металла в связи с переходом от формирования очага разрушения на поверхности к его формированию под поверхностью в области сверхмногоциклового усталости была введена диаграмма в соответствии с парадигмой Веллера [9]. Она рассматривает разрушение материала только в области малоциклового усталости с переходом в область сверхмногоциклового усталости, т.е. последовательно в направлении уменьшения уровня напряжения. Диаграмма учитывает нагружение только с остаточной деформацией, а области многоциклового усталости без остаточной деформации соответствует единственный уровень напряжения, определяемый как предел усталости металла (рис. 2). Рассматривается общепринятый механизм накопления повреждений при зарождении трещин на поверхности в связи с интенсивным формированием полос скольжения, в которых

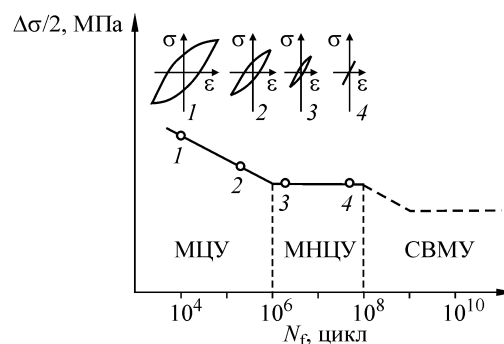


Рис. 2. Диаграмма, введенная Муграби [9] для объяснения перехода от малоциклового к сверхмногоциклового через многоциклового усталости в соответствии с парадигмой Веллера

образуется трещина. Такое представление позволило ввести соотношение между плотностью выявляемых на поверхности полос скольжения  $\bar{\rho}$  и количеством циклов до разрушения вплоть до  $10^6$  циклов нагружения для меди [9].

Вместе с тем с позиций физической мезомеханики каскад масштабов эволюции процессов пластической деформации связан с переходом от микроскопического (или наноразмерного) масштаба к макроскопическому масштабу через последовательность процессов, включающих мезомасштабный уровень [10].

На макромасштабном уровне следует рассматривать не только интенсивное скольжение в условиях развитой пластической деформации в качестве основного механизма накопления повреждений в области малоциклового усталости, но и вихревые потоки вплоть до поворота зерен с формированием ножевых границ. Эти процессы завершают масштабную иерархию и не действуют на мезомасштабном уровне, когда в металле реализуется многоцикловая усталость.

Более того, если рассматривать весь процесс усталости металлов на одном масштабном уровне вплоть до перехода в область сверхмногоциклового усталости, возникает противоречие с известным линейным законом суммирования повреждений при моделировании ресурса деталей в условиях нестационарного режима нагружения [11, 12]. Возникновение остаточной деформации связано с нелинейностью накопления повреждений, исключает возможность использования указанного закона суммирования повреждений. Однако этот закон реализован на практике во многих случаях, например при определении ресурса авиационных конструкций.

Более того, большинство металлов в элементах конструкций работают в условиях стыковочных соединений (заклепки, болты, сварные швы и т.д.), в которых остаточная деформация возникает только в случае перегрузок, т.е. при нарушении заданных конструктором условий работы, а не в рекомендованных условиях макроскопически упругого поведения металла. Даже такие элементы конструкции, как, например, диски компрессоров при реализуемой наработке 6000 полетов [13] и турбин при реализуемой наработке 2000 полетов [14] в авиационных газотурбинных двигателях не могут испытывать остаточные деформации. Проявление остаточных деформаций меняет геометрию и нарушает условия нагружения. Их проявление изменяет геометрию и условия нагружения, что выражено в задевании лопаток о корпус двигателя с преждевременным разрушением ротора. Это тем более важно подчеркнуть, т.к. число циклов нагружения рассматривается в области номинальных напряжений, при которых не превышает долговечность  $10^5$  полетов.

Все процессы накопления повреждений даже при малой наработке в эксплуатации протекают на мезоско-

пическом масштабном уровне и поэтому, на самом деле, ведущий механизм накопления повреждений связан не с уровнем максимального напряжения. За накопление повреждений в диске отвечает сочетание максимальной нагрузки и накладывающейся на него вибрации от лопаток [15]. Такая ситуация наиболее ярко проявляется при нагружении титановых сплавов [16].

Следовательно, представленная диаграмма не позволяет в полной мере охарактеризовать закономерность появления области сверхмногоциклового усталости, что требует уточнений, корректировки и дополнений к введенному объяснению существования области сверхмногоциклового усталости с позиций синергетики и физической мезомеханики, в которых иерархия масштабных уровней поведения металла при его деформировании является методологической основой [17].

Ниже представлены результаты анализа этой проблемы.

## 2. Область бифуркации ( $\Delta q_\sigma$ )<sub>3</sub>

С позиций синергетики эволюция поведения металла происходит в условиях непрерывного обмена энергией с окружающей средой и при достижении некоторых критических условий в накоплении повреждений реализуется смена ведущего механизма эволюции. Ведущий механизм одного масштабного уровня не может сохраняться в качестве ведущего процесса эволюции на другом масштабном уровне. Смена масштабов обусловлена сменой механизма накопления повреждений. Поэтому эволюция металла, выраженная в изменении долговечности, происходит при самоорганизованном каскаде смен масштабных уровней, в связи с изменением ведущего механизма разрушения.

Область перехода от одного масштабного уровня к другому ( $\Delta q_\sigma$ )<sub>i</sub> характеризуется некоторым интервалом плотности энергии деформации, или уровнем эквивалентного напряжения, в котором возникает неопределенность относительно того, каким будет процесс эволюции в данном конкретном экземпляре конструкции. При реализуемом уровне напряжения с разной вероятностью может быть реализован один или другой механизм накопления повреждений (рис. 3).

Ширина любой области бифуркации, ее положение относительно шкалы напряжения зависит от множества факторов [18]. Так, например, переход от области малоциклового усталости к области повторно-статического разрушения, когда формирование очага разрушения происходит под поверхностью, как и в случае монотонного растяжения образца, происходит в столь узком диапазоне изменения напряжений, что можно с достаточной точностью на макроуровне рассмотрения говорить об одном уровне напряжения ( $\sigma_e$ )<sub>0</sub>. При достижении этого уровня напряжения сосуществуют два способа поглощения энергии и может быть реализован с равной вероятностью один из двух способов зарожде-

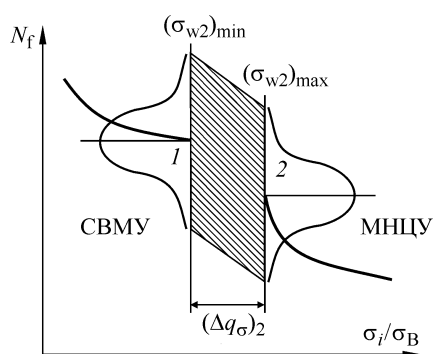


Рис. 3. Схема бимодального распределения усталостной долговечности на примере перехода от сверхмногоциклового к многоциклового усталости, характеризуемого в области бифуркации  $(\Delta q_\sigma)_i$  двумя усталостными кривыми с разными показателями степени уравнения (2), реализуемыми в области перехода с разной вероятностью  $P_i$

ния трещин на поверхности и под поверхностью. Это уровень напряжения, при достижении которого происходит переход от одной зависимости  $N_f = f(\sigma_e)$  к другой.

Согласно бифуркационной диаграмме (см. рис. 1) граница перехода в разрушении металлов от мезомасштаба (многоциклового усталости) к макромасштабу (малоциклового усталости) характеризует изменение в поведении металлов от макроскопически упругого к макроскопически пластичному, когда в металле реализуется остаточная деформация. Это понимание изменения в поведении материала представлено диаграммой Муграби (см. рис. 2), хотя речь идет не о единственном уровне напряжения, который соответствует «пределу усталости», а о некоторой области  $(\Delta q_\sigma)_3$  напряжений (диапазоне напряжений), которая отражает рассеяние свойств материала от образца к образцу.

Проводимый анализ указывает на то, что область  $(\Delta q_\sigma)_3$  должна включать в себя пороговую величину напряжения, которая показана на диаграмме рис. 2, но диапазон изменения напряжений должен сохраняться. Даже в случае рассмотрения усталости металлов только в области малоциклового усталости рассеяние экспериментальных данных значительно.

На самом деле на введенной Муграби диаграмме при рассматриваемом единственном уровне напряжения, являющемся пределом усталости  $\sigma_{-1}$ , реализуются три механизма разрушения материала. Первый — при долговечности около  $10^6$  циклов, соответствующий механизму малоциклового усталости (с остаточной деформацией). Второй — без гистерезиса при долговечности около  $10^7$  циклов для механизма многоциклового усталости. Третий — без петли гистерезиса для работок около  $10^8$  циклов, что соответствует границе перехода в область сверхмногоциклового усталости. Су-

ществование трех масштабов разрушения, отвечающих трем разным механизмам зарождения трещин при одном уровне напряжения, свидетельствует о мультимодальном распределении усталостной долговечности с разной вероятностью проявления для каждого из масштабов.

Следовательно, существенное отличие области  $(\Delta q_\sigma)_3$  для полной диаграммы усталостного разрушения от предела усталости на диаграмме Муграби заключается в том, что в области бифуркации  $(\Delta q_\sigma)_3$  реализуется только бимодальное распределение усталостной долговечности. При этом положение сопоставляемых характеристик поведения металла соответствует уровню напряжения около предела текучести материала.

Первоначально изменение в поведении металла в области  $(\Delta q_\sigma)_3$  было охарактеризовано как разрыв кривых усталости [19]. На самом деле в области напряжений около предела текучести материала  $\sigma_{0.2}$  в металле возникает неустойчивое состояние, когда при одном и том же уровне напряжения с разной вероятностью может возникать и отсутствовать остаточная пластическая деформация. В зависимости от типа материала в области  $(\Delta q_\sigma)_3$  могут быть реализованы три ситуации [20]: 1) для разрушений по механизму малоциклового усталости происходит переход к большим долговечностям по сравнению с разрушениями по механизму многоциклового усталости; 2) для малоциклового усталости происходит смещение долговечности в сторону меньших долговечностей по сравнению с многоциклового усталостью; 3) смещения для долговечности нет, но кривая  $N_f = f(\sigma_e)$  для малоциклового усталости имеет другой наклон по сравнению с кривой для многоциклового усталости.

В области  $(\Delta q_\sigma)_3$  происходит изменение в поведении материала, которое существенно зависит от того, в каком диапазоне соотношений  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  располагается металл. Так, например, в интервале соотношений  $0.71 < \sigma_{0.2}/\sigma_B < 0.83$  металл на разных образцах может проявлять себя как упрочняющийся, так и разупрочняющийся [21]. Следовательно, в области  $(\Delta q_\sigma)_3$  для разных образцов при фиксированном уровне напряжения могут проявляться два вида поведения металла: как упрочняющегося, так и разупрочняющегося. Это отражается в возникновении двух усталостных кривых, соответствующих бимодальному распределению усталостной долговечности.

Ширина области  $(\Delta q_\sigma)_3$  зависит от рассеивания характеристик материала и, в первую очередь, от рассеивания значений предела текучести материала.

Так, например, испытания малоуглеродистой стали (0.16 % C) на усталость при изменении среднего размера зерна от образца к образцу показали [22], что с увеличением размера зерна происходило уменьшение верх-

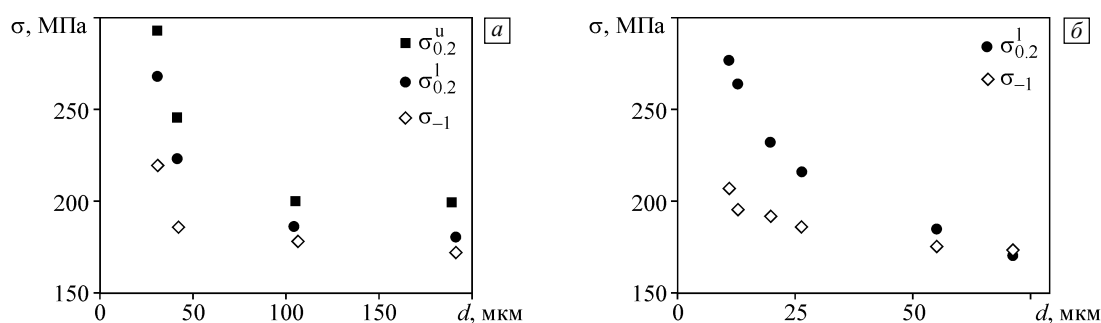


Рис. 4. Зависимости предела текучести и предела усталости для малоуглеродистой стали от размера зерна по данным [22] (а) и [23] (б)

него и нижнего предела текучести и предела усталости. Стоит отметить, что разница между пределами текучести и усталости уменьшается с ростом размера зерна, что отражается на увеличении значения отношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$ . Аналогичные результаты получены применительно к малоуглеродистой стали в работе [23]. С уменьшением среднего размера зерна происходило одновременное уменьшение нижнего предела текучести  $\sigma_{0.2}$  и предела усталости  $\sigma_{-1}$ , и при среднем размере зерна  $d \approx 72 \mu\text{m}$  величина предела усталости превышала значение нижнего предела текучести (рис. 4).

Поэтому при статистически разном среднем размере зерна диапазон рассеивания долговечности и ширины зоны  $(\Delta q_\sigma)_3$  может быть значительным.

Итак, область  $(\Delta q_\sigma)_3$  бимодального распределения усталостной долговечности принципиально отличается от переходной области от сверхмногоциклового к малоциклового усталости, которая характеризуется как «предел усталости», где реализуется мультимодальное распределение долговечности.

Проведем сопоставление указанного распределения с известным фактом мультимодального распределения долговечности в области перехода от сверхмногоциклового к многоциклового усталости [24].

### 3. Мультимодальное распределение долговечности

В области сверхмногоциклового усталости зарождение трещин под поверхностью обусловлено различными по природе концентраторами напряжений [3–8]. Более того, один из видов зарождения трещины связан с переходом металла в сверхтекучее состояние в зоне очага разрушения с формированием мелкокристаллической зоны по границам наноструктуры, имеющей преимущественно сферическую форму нанозерен. В связи с этим при уровнях напряжения, которые существенно ниже пороговой величины  $\sigma_{w2}$ , отвечающей пределу усталости  $\sigma_{-1}$ , разделяющему мезо- и микромасштабные уровни, разрушение в одном и том же материале под поверхностью может быть инициировано разными источниками при одном и том же уровне напряжения.

Например, исследования титанового сплава ВТ3-1 на образцах, вырезанных из диска компрессора авиационного двигателя, прошедшего полный цикл изготовления по существующей технологии штамповки и наработавшего в эксплуатации без замечаний 8000 ч, показал следующее [25, 26]. Очагами разрушения являлись границы ориентированных областей пластинчатой структуры, фасетки раскалывания глобул  $\alpha$ -фазы, а также границы пластинчатой структуры.

В металле с высокой анизотропией свойств по объему разрушение с разной вероятностью инициируется в очагах различной природы при фиксированном уровне напряжения. Это приводит к мультимодальному распределению усталостной долговечности, которое определяет общее ее рассеивание почти на три порядка (от  $10^8$  до  $10^{10}$  циклов) в области сверхмногоциклового усталости.

Повышение уровня напряжения до области  $(\Delta q_\sigma)_2$ , отвечающей переходу от сверхмногоциклового к многоциклового усталости, сопровождается перемещением зоны зарождения усталостной трещины в поверхностный слой металла. Решающее значение начинает играть природа поверхностного слоя и геометрия поверхности, где высокая чувствительность к концентрации напряжений сохраняет бимодальное распределение усталостной долговечности в области многоциклового усталости.

В рамках исследований физической мезомеханики поверхности и поверхностного слоя металла выявлено существование геометрических концентраторов напряжения в виде: 1) кривизны решетки как решающего фактора в запуске механизма накопления дислокаций [27], 2) формирования шахматного рельефа на поверхности металла [28]. При этом весь поверхностный слой является неоднородным как по уровню остаточных напряжений, так и по распределению химических элементов, включая тонкий окисленный слой поверхности, который контактирует с окружающей средой. Средой служит ускорителем процесса движения дислокаций внутрь материала и способствует ускорению достижения их критической плотности с формированием полосовой дислокационной структуры, возникающей на завершаю-

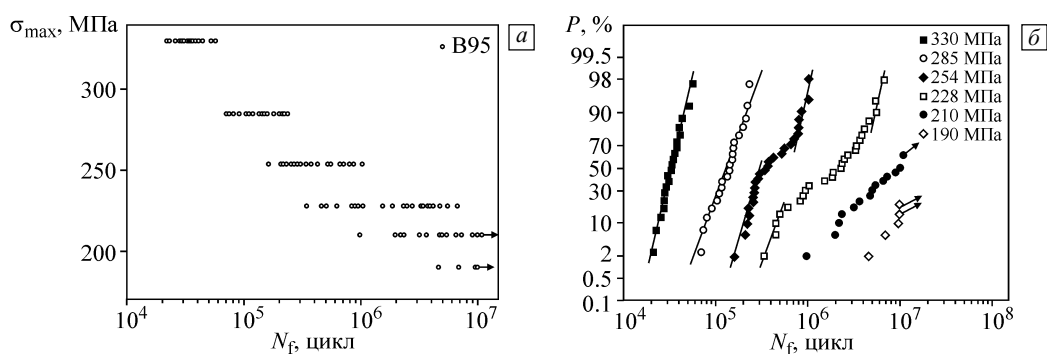


Рис. 5. Данные усталостных испытаний образцов из алюминиевого сплава В95 (а) и кривые распределения долговечности усталостных образцов из алюминиевого сплава В95 (б) (по данным из [2])

щей стадии перед зарождением трещины в области многоциклового усталости [20].

Роль этих факторов приводит к активизации поверхности с ростом уровня напряжения по сравнению с внутренними объемами материала. Поскольку в поверхностном слое и на самой поверхности, как указано выше, действуют несколько механизмов, создающих условия для зарождения трещины, то в области  $(\Delta q_\sigma)_2$  реализуется мультимодальное распределение долговечности. Одна мода отвечает зарождению трещин еще под поверхностью с убывающей вероятностью при возрастании уровня напряжения. Две другие моды распределения с разной вероятностью сохраняются на мезоскопическом масштабном уровне вплоть до некоторого уровня напряжения, величина которого пока не изучена и не соотнесена с механическими характеристиками материала.

Впервые бимодальное распределение усталостной долговечности в области многоциклового усталости было выявлено и изучено применительно к широкому классу металлов на основе Ni, Ti, Al и Fe [29]. Установлено, что наблюдаемое рассеивание усталостной долговечности в области многоциклового усталости и около зоны  $\Delta q_{w2}$  характеризуется следующим условием:

$$\lg N_\Sigma = p_1 \lg N_1 + p_2 \lg N_2, \quad (3)$$

где  $p_1, p_2$  — вероятности проявления одного и другого механизма разрушения;  $\lg N_1, \lg N_2$  соответствуют долговечности материала для одного и другого механизма разрушения.

Важно отметить, что подобные экспериментальные данные были получены во многих испытаниях, однако они не были проанализированы аналогично [29]. Например, в ГОСТ 25.502-79 [2], устанавливающем методы испытаний образцов металлов и сплавов на усталость, приведена таблица значений результатов эксперимента по испытанным образцам из алюминиевого сплава В95, которые в графической форме представлены на рис. 5, а. Приведены данные испытаний в ус-

ловиях консольного изгиба с вращением при шести уровнях напряжений, на каждом из которых было использовано от 20 до 26 образцов. База испытаний составляла  $10^7$  циклов. Как следует из результатов эксперимента, например, в области напряжений 228 МПа имеется большое рассеивание долговечности почти от  $10^5$  до  $10^7$  циклов.

Построенные вероятностные кривые распределения долговечности для разных уровней напряжения по Вейбуллу показывают, что имеет место не одно, а два ее распределения с переходной областью, начиная с использованного в опыте уровня напряжения 254 МПа (рис. 5, б). Этот экспериментальный факт показывает, что для выявления бимодального распределения долговечности на мезомасштабном уровне около зоны  $(\Delta q_\sigma)_2$  требуется большая статистика по испытанным образцам. При малом количестве образцов реализуемое различие в поведении металла усредняется и не может быть проанализировано.

Природа формирования очагов зарождения трещин, характеризуемых одной и другой ветвями бимодального распределения долговечности, была проанализирована применительно к титановому сплаву ВТ9, испытания которого были выполнены при температуре 450 °С на воздухе [22]. Данные по испытаниям образцов приведены на рис. 6.

В обоих случаях зарождение трещин происходит на поверхности от концентраторов напряжения в виде риска от механической обработки образцов (рис. 7). При очевидном бимодальном распределении долговечности имеется похожая, как кажется, ситуация с зарождением трещины. Однако в рассматриваемом случае происходит зарождение трещины от разных источников в охрупченном поверхностном слое. При низком уровне напряжения трещина зарождается в самом слое от физического концентратора напряжения, которым является охрупченный поверхностный слой, а при высоком уровне напряжения доминирует зарождение трещины от геометрического концентратора напряжения, которым яв-

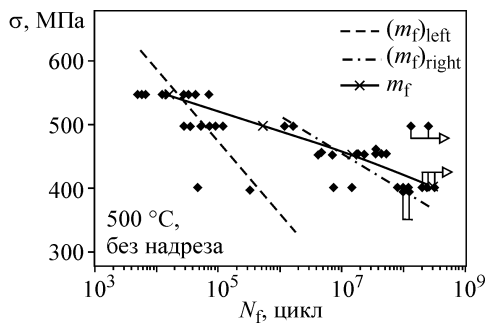


Рис. 6. Усталостные кривые гладких круглых образцов титанового сплава ВТ9 при температуре испытания 500 °С с указанием бимодального распределения усталостной долговечности (левая и правая ветви усталостной кривой). Сплошная линия отвечает осредненной усталостной кривой

ляется риска на поверхности от механической обработки.

Итак, на мезоскопическом масштабном уровне реализуются два этапа в разрушении материала при циклическом нагружении. Их условно можно разделить на уровни мезо I и мезо II, как это было предложено ранее при анализе масштабной иерархии процессов пластической деформации в случае монотонного растяжения образцов [10]. При возрастании уровня напряжения на уровне мезо I реализуется бимодальное распределение усталостной долговечности, когда первоначально доминирует физический концентратор напряжения. Им явля-

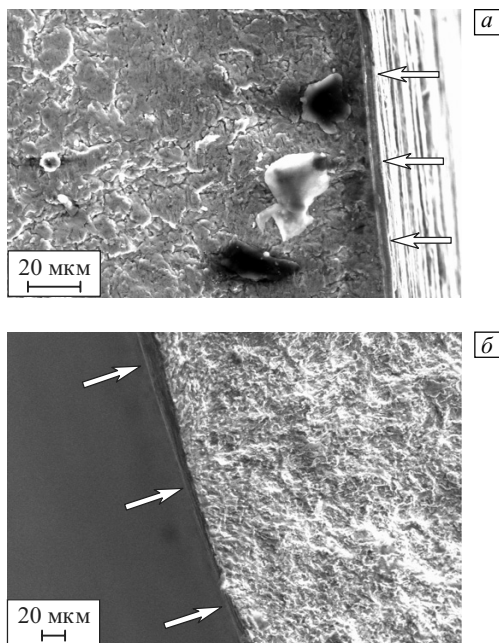


Рис. 7. Очаги усталостного разрушения гладких образцов из титанового сплава ВТ9 (показаны стрелками), испытанных на изгиб с вращением, после разрушения при долговечности около  $10^7$  (а) и  $10^8$  циклов нагружения (б)

ется тонкий окисленный поверхностный слой, в котором за критический уровень накопления повреждений при зарождении трещин отвечают: 1) неоднородность химического состава в поверхностном слое; 2) остаточные напряжения; 3) охрупчивание материала из-за окисления поверхности; 4) кривизна решетки, благодаря которой происходит накопление предельного уровня дислокаций с формированием полосовой дислокационной структуры.

На втором уровне мезо II при возрастании напряжения активизируется роль геометрического концентратора напряжения. За критический уровень накопления повреждений при зарождении трещин отвечают: 1) наличие геометрических концентраторов напряжения; 2) формирование «шахматного рельефа»; 3) возникновение вихревых потоков деформации.

Следовательно, на мезоскопическом масштабном уровне в области многоциклового усталости действуют механизмы зарождения трещин, которые принципиально отличаются от хорошо изученного механизма формирования полос скольжения, определяющего накопление повреждений в области малоциклового усталости на макроскопическом масштабном уровне и, согласно представлениям физической мезомеханики, сопровождаются поворотами объемов материала вплоть до формирования ножевых границ [10].

Таким образом, полная диаграмма усталости металлов представляется как характеристика трех масштабных уровней, границы между которыми определяются бимодальным и мультимодальным распределением усталостной долговечности внутри областей  $(\Delta q_\sigma)_i$  (рис. 8). Определяемый в рамках существующей методологии испытания металлов на усталость «предел усталости» на самом деле представляет собой один из уровней напряжения, который принадлежит области перехода  $\Delta q_{wi}$ . Важно подчеркнуть, что только в интервале долговечности  $3 \cdot 10^6 - 10^8$  циклов правомерно рас-

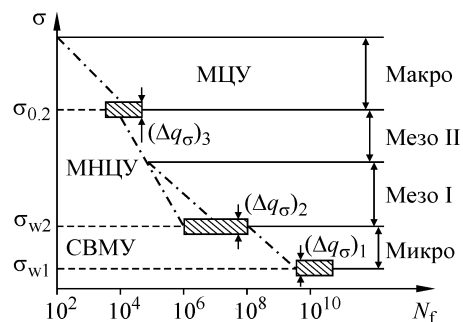


Рис. 8. Полная диаграмма усталости металлов, построенная в соответствии с парадигмой Веллера, которая учитывает трехмасштабную иерархию процессов накопления повреждений, области бифуркации  $(\Delta q_\sigma)_i$ , а также учитывает появление бимодального распределения усталостной долговечности на мезоскопическом масштабном уровне

смагивать величину  $\sigma_{-1}$  как характеристику предела усталости металлов. Для каждого металла такая характеристика одна, но в зависимости от вида материала величина  $\sigma_{-1}$  характеризует разные области перехода  $(\Delta q_{\sigma})_i$  от одного масштабного уровня к другому.

В связи с этим проведем сопоставление границ областей масштабов, отвечающих процессам усталости металлов, с величиной предела усталости  $\sigma_{-1}$  в зависимости от механических характеристик материала.

#### 4. Границы масштабных уровней

Проведенный анализ показывает, что предел усталости как характеристика поведения материала представляет собой верхнюю границу области перехода между разными масштабными уровнями. Фактически предельное состояние материала реализуется в том смысле, что происходит смена масштабов реализуемых процессов накопления повреждений в зоне зарождения трещины. Величина  $\sigma_{-1}$  может быть определена в зависимости от прочностных характеристик материала [30]. Ширина одной из зон перехода  $(\Delta q_{\sigma})_3$  от многоциклового к малоциклового усталости зависит от отношения  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ . Поэтому был выполнен анализ влияния механических характеристик  $\sigma_{0.2}$  и  $\sigma_B$  на предел усталости  $\sigma_{-1}$ , а также отношения  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  на отношение  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  применительно к авиационным конструкционным металлическим материалам на основе Fe, Al, Mg, Ti и Cu с использованием данных [31]. Общее количество проанализированных материалов составило около 250.

Выявлено, что тенденция в изменении  $\sigma_{-1}$  от  $\sigma_{0.2}$  и  $\sigma_B$  имеет одинаковый характер. С возрастанием обеих характеристик материала, определяемых при статическом нагружении, увеличивается значение предела усталости (рис. 9). При этом для разных материалов имеет место нарастание рассеивания  $\sigma_{-1}$ , т.е. связь предела усталости с рассматриваемыми характеристиками материала снижается. Это связано с различием

в поведении разных металлов в условиях циклического нагружения. Например, сопоставление указанных зависимостей для сталей и титановых сплавов показывает, что для стали рассеивание предела усталости в зависимости от предела текучести или прочности растет незначительно, тогда как для титановых сплавов эта тенденция более выражена.

Количественные оценки связи предела усталости с механическими характеристиками показали, что  $\sigma_{-1} = A\sigma_{0.2}^{\alpha}$  или  $\sigma_{-1} = B\sigma_B^{\beta}$ , где  $A$  и  $B$  — некоторые постоянные;  $\alpha$  и  $\beta$  — показатели степенных соотношений. Это не противоречит полученным ранее в [30] зависимостям.

Для авиационных материалов на основе Cu получены значения постоянных  $A=7.88$ ,  $B=1.44$  и показатели  $\alpha=0.51$ ,  $\beta=0.75$ , а для сплавов на основе Fe  $A=6.52$ ,  $\alpha=0.63$ , для материалов на основе Al  $B=0.66$ ,  $\beta=0.86$ . Для материалов на основе Ti и Mg наблюдается большое рассеивание значения предела усталости в зависимости от значения либо предела текучести, либо прочности, поэтому не было выявлено функциональной зависимости между рассматриваемыми характеристиками этих материалов.

В зависимости соотношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  от отношения  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  граница, определяемая пределом усталости  $\sigma_{-1}$ , характеризует: в случае  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} < 1$  переход от сверхмногоциклового к многоциклового усталости; в случае  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \geq 1$  переход от сверхмногоциклового к малоциклового усталости. Сопоставление указанного отношения с отношением  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  показало, что подавляющее большинство приведенных конструкционных авиационных материалов удовлетворяет условию  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} < 1$  и лишь шесть сплавов на основе Cu, три сплава на основе Al и один сплав на основе Mg находятся в области, где  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \geq 1$  (рис. 10). Поэтому область многоциклового усталости является основной областью циклического нагружения авиационных материалов в эксплуатации без остаточной пластической деформации.

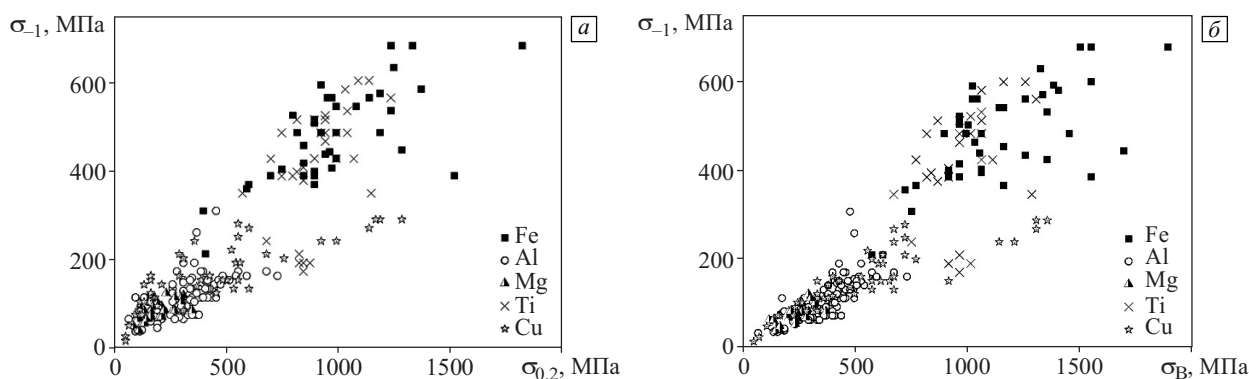


Рис. 9. Зависимости предела усталости от предела текучести (а) и предела прочности (б), построенные по данным для конструкционных авиационных материалов на основе Fe, Al, Mg, Ti и Cu из справочника [31]

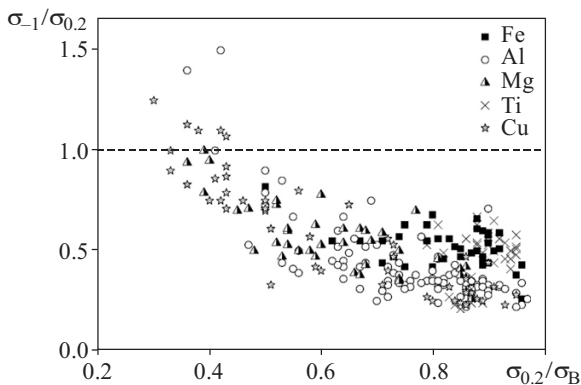


Рис. 10. Зависимости отношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  от  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ , построенные по данным для авиационных материалов на основе Fe, Al, Mg, Ti и Cu из справочника [31]

Проведенные сопоставления предела усталости и отношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  с механическими характеристиками материала и их отношением  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  позволяют рассмотреть общую закономерность в изменении поведения материала при циклическом нагружении в связи с изменением механических характеристик материала в таком виде (рис. 11). Полная диаграмма усталости металлов (см. рис. 8) включает в себя все масштабные уровни разрушения, отвечающие сверхмногоциклового, многоциклового и малоциклового усталости. По мере того как возрастает отношение  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  для разных материалов, происходит уменьшение диапазона напряжений, в котором может быть реализован мезомасштабный уровень с многоциклового усталостью (перемещение области  $(\Delta q_\sigma)_1$  и  $(\Delta q_\sigma)_2$  показано стрелкой вверх на рис. 11). Одновременно с этим происходит перемещение области перехода  $(\Delta q_\sigma)_3$  в область больших долговечностей (показана горизонтальной стрелкой вправо на рис. 11), так что в пределе максимальное число циклов, которое может соответствовать области ма-

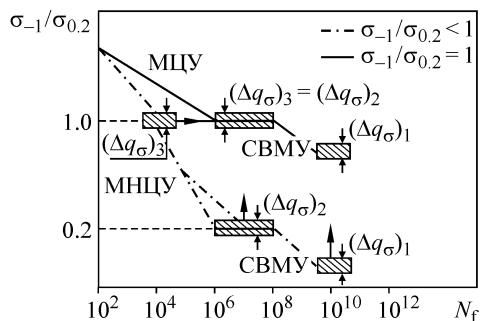


Рис. 11. Диаграммы усталости металлов с областями бифуркации  $(\Delta q_\sigma)_i$ , построенные в соответствии с парадигмой Веллера для ситуации, рассмотренной Муграби, когда  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} = 1$  и в общем случае, когда  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} < 1$

лоциклового усталости, приближается к  $10^6$  циклов. Граница области малоциклового усталости по долговечности определяется минимальным значением около  $10^4$  циклов при минимальном отношении  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$ , которое применительно к исследованным авиационным конструкционным материалам составляет около 0.2. Поэтому граница максимальной долговечности для области малоциклового усталости определяется не механическими характеристиками, а отношением  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$ .

## 5. Выводы

Используемый в качестве характеристики материала так называемый предел усталости на самом деле является верхней границей интервала напряжений  $(\Delta q_\sigma)_i$ , в пределах которого реализуется мультимодальное распределение усталостной долговечности разрушающихся образцов.

В случае  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} < 1$  интервал  $(\Delta q_\sigma)_i$  отвечает переходу от сверхмногоциклового (микро- или наноразмерный масштаб) к многоциклового (мезомасштаб) усталости.

В случае  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \geq 1$  интервал  $(\Delta q_\sigma)_i$  отвечает переходу от сверхмногоциклового к малоциклового (макромасштаб) усталости.

С уменьшением соотношения  $\sigma_{0.2}/\sigma_B$  в авиационных материалах реализуется тенденция к возрастанию отношения  $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$  вплоть до единицы, когда область мезомасштабного уровня, отвечающая многоциклового усталости, вырождается.

Переход к мезомасштабному уровню сопровождается бимодальным распределением усталостной долговечности с последовательным изменением вероятности зарождения трещины по одному из двух механизмов зарождения трещины, каждый из которых доминирует на масштабе мезо I и мезо II.

На мезоуровне I за критический уровень накопления повреждений при зарождении трещин отвечают: неоднородность химического состава в поверхностном слое; остаточные напряжения; охрупчивание материала из-за окисления поверхности; кривизна решетки, за счет которой происходит накопление предельного уровня дислокаций с формированием полосовой дислокационной структуры.

На мезоуровне II за критический уровень накопления повреждений при зарождении трещин отвечают: наличие геометрических концентраторов напряжения; формирование «шахматного рельефа»; возникновение вихревых потоков деформации.

За формирование очагов усталостного разрушения в металле на макроскопическом масштабном уровне, в соответствии с принципами физической мезомеханики, отвечает интенсивное скольжение с поворотами объемов материала вплоть до создания ножевых границ.

## Литература

1. *Машиностроение*. Энциклопедия. Т. II-1. Физико-механические свойства, испытания металлических материалов / Под общ. ред. Е.И. Мамаева. – М.: Машиностроение, 2010. – 851 с.
2. *ГОСТ 25.502-79*. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во «Стандарт», 2005.
3. *Bathias C., Paris P.C.* Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. – New York: Marcel Dekker, 2005. – 305 p.
4. *Proceedings of the III International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-3)*, September 16–19, 2004, Ritsumeikan University, Kusatsu, Japan / Ed. by T. Sakai, Y. Ochi. – Japan: The Society of Materials Science, 2004. – 690 p.
5. *Proceedings of the VI International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4)*, August 19–22, 2007, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA / Ed. by J.E. Allison, J.W. Jones, J.M. Larsen, R.O. Ritchie. – TMS, 2007. – 568 p.
6. *Proceedings of the VII International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-7)*, July 3–5, 2017, Dresden, Germany / Ed. by M. Zimmermann, H.-J. Christ. – Dresden, DVM, Germany, 2017. – 580 p.
7. *Shanyavskiy A.* Ultrahigh plasticity behavior of metallic materials in the ultra-high-cycle (or gigacycle, very-high-cycle,) fatigue regime // *Key Eng. Mater.* – 2016. – V. 664. – P. 231–245.
8. *Шанявский А.А.* Масштабные уровни процессов усталости металлов // *Физ. мезомех.* – 2014. – Т. 17. – № 6. – С. 87–98. – doi 10.24411/1683-805X-2014-00067.
9. *Mughrabi H.* Specific features and mechanisms of fatigue in the ultra-high-cycle regime // *Int. J. Fatigue.* – 2006. – V. 28(11). – P. 1501–1508.
10. *Panin V.E.* Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids // *Theor. Appl. Fract. Mech.* – 1998. – V. 30(1). – P. 1–11.
11. *Palmgren A.G.* Die Lebensdauer von Kugellagern // *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI Zeitschrift)*. – 1924. – V. 68. – No. 14. – P. 339–341.
12. *Miner M.A.* Cumulative damage in fatigue // *J. Appl. Mech. A.* – 1945. – P. 159–164.
13. *Шанявский А.А.* Безопасная эксплуатация дисков I ступени КНД двигателей семейства Д-30КУ по критерию роста усталостных трещин // *Проблемы безопасности полетов*. – 2011. – № 1. – С. 20–48.
14. *Shanyavskiy A.A.* Fatigue crack propagation in turbine disks of EI698 superalloy // *Frattura Integrita Strutturale*. – 2013. – V. 7. – No. 24. – P. 13–25.
15. *Шанявский А.А.* Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. – Уфа: Монография, 2003. – 800 с.
16. *Marci G.* Non-propagation conditions ( $\Delta K_{th}$ ) and fatigue crack propagation threshold ( $\delta K_p$ ) // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1994. – V. 17. – No. 8. – P. 891–908.
17. *Панин В.Е.* Синергетические принципы физической мезомеханики // *Физ. мезомех.* – 2000. – Т. 3. – № 6. – С. 5–36.
18. *Шанявский А.А.* Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. – Уфа: Монография, 2007. – 500 с.
19. *Шабалин В.И.* Экспериментальное исследование формы кривой усталости // *Прочность металлов при циклических нагрузках / Под ред. В.С. Ивановой*. – М.: Наука, 1967. – С. 162–169.
20. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
21. *Терентьев В.Ф.* Общие закономерности усталостного разрушения ОЦК-металлов // *Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов*. – М.: Наука, 1981. – С. 45–52.
22. *Екобори Т.* Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М.: Металлургиздат, 1971. – 226 с.
23. *Phillips W.L., Armstrong R.W.* The influence of specimen size, polycrystal grain size, and yield point behaviour on the fatigue strength of low-carbon steel // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1969. – V. 17. – No. 4. – P. 265–270.
24. *Shanyavskiy A., Zaharova T., Potapenko Yu.* The Nature of Multimodal Distribution of Fatigue Durability for Titanium Alloy VT9 // *Proceedings of the Forth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4)*, August 19–22, 2007, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA / Ed. by J.E. Allison, J.W. Jones, J.M. Larsen, R.O. Ritchie. – TMS, 2007. – P. 325–330.
25. *Nikitin A., Palin-Luc T., Shanyavskiy A.* Crack initiation in VHCF regime on forged titanium alloy under tensile and torsion loading modes // *Int. J. Fatigue*. – 2016. – V. 93(2). – P. 318–325.
26. *Nikitin A., Palin-Luc T., Shanyavskiy A., Bathias C.* Comparison of crack paths in a forged and extruded aeronautical titanium alloy loaded in torsion in the gigacycle fatigue regime // *Eng. Fract. Mech.* – 2016. – V. 167. – P. 259–272.
27. *Панин В.Е.* Физическая мезомеханика материалов. – Томск: ТГУ, 2015. – Т. 1. – 460 с.; Т. 2. – 462 с.
28. *Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д.* «Шахматный» мезоэффект интерфейса в гетерогенных средах в полях внешних воздействий // *Физ. мезомех.* – 2006. – Т. 9. – № 6. – С. 5–15.
29. *Захарова Т.П.* К вопросу о статистической природе усталостной повреждаемости сталей и сплавов // *Проблемы прочности*. – 1974. – № 4. – С. 17–23.
30. *Троценко В.Т., Сосновский Л.А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник в 2-х ч. – Киев: Наукова думка, 1987. – Ч. 1. – 347 с.
31. *Авиационные материалы: Справочник в 9 т. / Под ред. А.Т. Туманова*. – М.: ВИАМ, 1975.

Поступила в редакцию 15.10.2018 г.,  
 после доработки 15.10.2018 г.,  
 принята к публикации 07.11.2018 г.

## Сведения об авторах

Шанявский Андрей Андреевич, д.т.н., проф., нач. отд. «Авиарегистр России», 106otdel@mail.ru  
 Солдатенков Алексей Павлович, нач. сект. «Авиарегистр России», 106otdel@mail.ru