

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Физическая мезомеханика.
Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

**в рамках
Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/9

**ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА: НОВОЕ ПОНИМАНИЕ ОПИСАНИЯ
УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ**

^{1,2}Шанявский А.А., ¹Солдатенков А.П.

¹Авиационный регистр Российской Федерации, Московская область, Химки

²Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Развитие процесса усталостного разрушения металла реализуется в два этапа: первоначально в металле накапливаются повреждения до некоторого предельного уровня, после чего начинает распространяться усталостная трещина. К сожалению, до настоящего времени неразрушающие средства контроля не позволяют определять предельный уровень накопления дефектов, при достижении которого зарождается усталостная трещина, поэтому основное внимание для обеспечения, например, безопасности полётов уделяется стадии распространения трещин. Благодаря введению в рассмотрение процессов деформации и разрушения металлов мезоскопического масштабного уровня [1] удалось показать, что стадия распространения сквозных усталостных трещин реализуется на трёх масштабах, и объяснить причину перехода от одного масштаба к другому. Введение мезомасштабного уровня позволило понять, почему рельеф излома в виде усталостных бороздок отличается от рельефа на начальной стадии роста трещин, когда наблюдается рельеф в виде строчечности или псевдобороздчатый рельеф. Переход к усталостным бороздкам обусловлен переходом от сдвиговой неустойчивости к ротационным эффектам пластической деформации и разрушения материала. Факт ротаций объёмов металла в рамках физической мезомеханики при развитии усталостной трещины был многократно продемонстрирован [1].

Важно подчеркнуть, что области малоциклового (МЦУ) и многоциклового (МНЦУ) усталости в рамках физической мезомеханики были строго разделены по физической сущности наблюдаемых явлений, а не по формальному признаку, каким является количество циклов до разрушения. В области МНЦУ решающую роль в зарождении трещины играет поверхностный слой, поэтому именно блокировка процессов накопления повреждений в поверхностном слое обеспечивает требуемую долговечность конструкции. В области МЦУ ответственность за зарождение усталостного разрушения несёт весь объём по сечению металла, в котором реализуется макроскопический процесс пластической деформации посредством самосогласованного накопления повреждений по сечению за счёт сдвигов и ротаций объёмов металла.

Такое различие в поведении металла на макромасштабе (МЦУ) и мезомасштабе (МНЦУ) привело к пониманию того, что в иерархии масштабов должен быть и микроскопический уровень накопления повреждений. Таким масштабным уровнем оказалась сверхмногоцикловая усталость (СВМУ), для которой так называемый «предел усталости» материала σ_{-1} является верхней границей масштаба, а не нижней границей диаграммы усталости. В этом случае зарождение трещин происходит во внутренних объёмах, но именно локализация пластической деформации на границах внутренних концентраторов напряжения приводит к формированию очагов разрушения в результате перехода металла в сверхпластичное состояние с возникновением ротаций – представления физической мезомеханики совершили переход на нано размерный масштабный уровень.

Проведённый анализ статистических данных о параметрах усталостных кривых для авиационных сплавов показал, что в зависимости от соотношения $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$ следует рассматривать разные виды или типы усталостных кривых [2]. В том случае, когда $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} < 1$, реализуются все три масштабных уровня, а на мезоскопическом масштабном уровне наблюдается изменение в поведении материала, которое отвечает переходу от подуровня Мезо I к Мезо II в связи со сменой механизма накопления повреждений в поверхностном слое. Указанная смена в механизме накопления повреждений приводит к необходимости определять границу перехода от масштабного уровня Мезо I к Мезо II по уровню критического напряжения σ_{*} . Верхний индекс у введённого уровня напряжения σ_{*}

указывает на его критический уровень, а нижний индекс «i» показывает различие его величины для разных металлов и соотношений $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$. Так, например, анализ статистических данных по алюминиевому сплаву В95, представленных в ГОСТ 25.502-79, показал, что описание всех данных испытаний одной усталостной кривой является не правомерным. На самом деле, в соответствие с методологией, разработанной Т.П. Захаровой, при соотношении $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} \leq 0.4$ следует вводить две усталостных кривых на мезомасштабном уровне, как это показано на рис. 1.

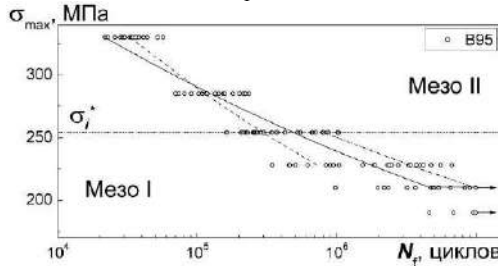


Рис. 1. Две кривые усталости на мезомасштабном уровне для алюминиевого сплава В95 по экспериментальным данным, представленным в ГОСТ 25.502-79

Таким образом, на основе трёхмасштабного описания поведения металлов согласно представлениям физической мезомеханики необходимо рассматривать эволюцию в накоплении повреждений от микро-, к мезо- и макроскопическому масштабу в соответствии со следующими соотношениями:

$$N_f = \begin{cases} C_1 \sigma^{-m_1}, & \text{при } \sigma < \sigma_{-1} \\ C_2 \sigma^{-m_2}, & \text{при } \sigma_{-1} < \sigma < \sigma_i^* \\ C_3 \sigma^{-m_3}, & \text{при } \sigma_i^* \leq \sigma < \sigma_{0.2} \\ C_4 \sigma^{-m_4}, & \text{при } \sigma_{0.2} \leq \sigma \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{Микро} \\ \text{Мезо I} \\ \text{Мезо II} \\ \text{Макро} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{СВМУ} \\ \text{МНЦУ - I} \\ \text{МНЦУ - II} \\ \text{МЦУ} \end{cases} \quad (1)$$

Понимание принципиальных различий в механизмах разрушения, действующих и определяющих поведение металла на трёх масштабных уровнях, позволило выявить связь между количеством циклов, при которых происходит переход от мезомасштабного уровня к макроскопическому масштабу, с интервалом напряжений, отвечающих области МНЦУ. Оказалось, что с изменением соотношения $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$, которое определяется уровнями напряжений для границ мезомасштабного уровня, в интервале 0.2-1.0 для авиационных сплавов зависимость $N_{0.2} = f(\sigma_{-1}/\sigma_{0.2})$ имеет разный вид для сплавов на различной основе, где $N_{0.2}$ соответствует количеству циклов на границе перехода от мезо- к макро-масштабу. При минимальном значении $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2}$ границе масштабов соответствует долговечность $N_{0.2} = 2 \cdot 10^3$ циклов, а при соотношении $\sigma_{-1}/\sigma_{0.2} = 1$ величина $N_{0.2} = 10^6$ циклов, что соответствует мезо и макроскопическому масштабному уровню. Диаграмма усталостного разрушения не меняет своей сущности при изменении условий нагружения, качества металла и прочее. Меняются лишь уровни напряжения, которые определяют границы мезомасштабного уровня разрушения металла. В представленном докладе рассмотрены стадии распространения усталостных трещин и общие закономерности изменения долговечности металлов при циклическом нагружении с позиций физической мезомеханики материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-00705).

1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов. – Томск: ТГУ, 2015. Т. 1, 460 с. Т. 2, 462 с.
2. Шпаянский А.А., Солдатенков А.П. Масштабные уровни предела усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 1. С. 44-53.