

А. М. Щипачев, В. С. Мухин

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПЕРЕХОД ОТ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ К МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Показано, что при росте температуры переход от сверхмногоциклового к многоциклового усталости происходит при меньшей долговечности. Следствие этого – в области сверхмногоциклового усталости неэффективно применение упрочняющих методов обработки, поскольку в этом случае металл всегда разрушается из-под поверхности. *Усталостная долговечность; сверхмногоциклового усталости; многоциклового усталости; температурно-ресурсные зоны*

Традиционные представления об усталостном нагружении, связанные с кривой Велера, в настоящее время претерпевают изменения. Развитие синергетики, неравновесной термодинамики позволили рассмотреть с новых позиций процесс усталостной повреждаемости и разрушения. При этом перед исследователями предстала картина намного более сложная и многообразная. Появилась возможность объяснить ранее неизвестные причины поведения металла.

Достаточно новое понятие в науке «сверхмногоциклового усталости» (СМЦУ) может быть объяснено также с позиций синергетики. Как выяснилось, традиционная кривая Велера оказалась неточна. Согласно традиционным представлениям, при достижении некоторой амплитуды переменных напряжений $\sigma_a = \sigma_R$ разрушение не должно произойти при неограниченном числе циклов N . Величина σ_R названа пределом выносливости. Предполагается, что если при достижении некоторой базы испытания (к примеру, при сравнительных испытаниях для черных металлов она принимается равной $5 \cdot 10^6$ циклов [1]) разрушения не произойдет, значит, оно не произойдет и при $N \rightarrow \infty$.

Однако в исследованиях последних лет [2, 3] показано, что в действительности это не так. Если продолжить испытания при $\sigma_a \leq \sigma_R$ в область больших долговечностей, то после горизонтального участка наблюдается снова наклонный участок при $N = 10^8 \dots 10^{10}$ циклах. Разрушение произойдет при $\sigma_a < \sigma_R$! На рис. 1 для иллюстрации представлены результаты испытаний высокопрочной стали как в области многоциклового усталости (МНЦУ), так и в области СМЦУ (данные А. А. Шанявского [4]).

Испытания на СМЦУ длительны и дорогостоящи. К примеру, при частоте нагружения

6000 об./мин. (машина МУИ-6000) достижение $N = 10^9$ циклов займет 2780 часов (чуть меньше 4 месяцев). С появлением высокочастотных машин для усталостных испытаний (порядка 25 кГц) сократились сроки проведения испытаний и появились новые данные по СМЦУ.

Как видно на рис. 1, существуют два наклонных участка (и это было доказано многими исследователями [2, 3, 4 и др.]): первый соответствует термодинамически *открытой системе*, к описанию которой необходимо применять принципы синергетики, второй – *частично замкнутой системе*, описываемой равновесной термодинамикой. В частично замкнутой системе процессы «более обратимы» и медленно изменяются во времени. Рассеяние экспериментальных данных снижается [4].

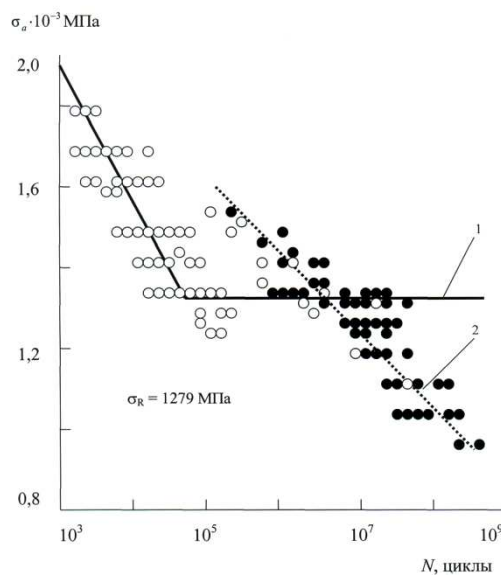


Рис. 1. Экспериментальные кривые усталостного разрушения образцов из высокопрочной стали в области МНЦУ (кривая 1) и СМЦУ (кривая 2) [4]

Как оказалось, в соответствии с синергетическими представлениями предел выносливости не один, а происходит его квантование, т. е. теоретически их, по меньшей мере, три. Они соответствуют бифуркационным переходам при изменении σ_a . А. А. Шанявский отмечает [4]: «Металл под действием циклической нагрузки при переходе от одного уровня возрастающего напряжения к другому испытывает ряд дискретных, самоорганизованных переходов к способам диссипации энергии, позволяющим поддерживать его устойчивость, что выражено в изменении условий зарождения усталостных трещин. В области напряжений ниже σ_R частично замкнутая система реализует предельное состояние по моменту возникновения трещины *на удалении от поверхности*».

С ростом напряжений ($\sigma_a > \sigma_R$) роль поверхности в возникновении трещины начинает возрастать. Как показывают исследования, с уменьшением напряжений зарождение трещины начинается под поверхностью.

К примеру, анализ результатов исследований влияния лазерного упрочнения поверхности на усталостную прочность А1 – сплава 2024 – Т3 (А. А. Шанявский [4]) в интервале напряжений 295...270 МПа показал, что произошла смена механизма разрушения. Трещины, зарождавшиеся с поверхности при более высоком напряжении, зарождаются под поверхностью после перехода через точку неустойчивости по уровню уменьшающегося циклического напряжения.

Из этого следует, что кривая 1 (рис. 1) диаграммы усталостного разрушения соответствует поверхностному разрушению, роль состояния поверхности при этом значительна, следовательно, велика роль технологического воздействия на поверхность. Кривая 2 соответствует частично замкнутой системе и подповерхностному очагу разрушения: трещина в любом случае будет зарождаться под поверхностью и влияние технологии поверхностной обработки на долговечность должно быть незначительно.

При понижении переменных напряжений ниже σ_R , неупрочненная деталь (образец) (рис. 1) как термодинамическая система переходит с кривой 1 на кривую 2 (разрушение с поверхностного становится подповерхностным). Если упрочнить поверхности детали (ППД), то она будет разрушаться уже как частично замкнутая система, т. е. по кривой 2 даже при $\sigma_a > \sigma_R$ (см. участок кривой 2 выше σ_R , рис. 1). Таким образом, упрочняя деталь, мы искусственно переводим ее в состояние частично замкнутой системы. При этом зарождение трещины – под-

поверхностное и влияние состояния поверхности (шероховатости, покрытий) на усталость невелико.

Все опубликованные исследования в этой области не рассматривают температуру как внешний фактор. При высокотемпературных испытаниях порядка 500–900 °С, соответствующих реальным условиям эксплуатации деталей ГТД, физическая картина повреждаемости и разрушения меняется. Термодинамический переход «частично замкнутая система – открытая система» (кривая 1 – кривая 2, рис. 1) может трансформироваться.

Применительно к жаропрочным сплавам при высоких температурах, соответствующих эксплуатационным, близким к температурам отпуска, были определены области в координатах «амплитуда переменных напряжений – долговечность до разрушения» ($\sigma - N$), в которых эффективны те или иные методы ППД [5]. Исследования проводились для двух марок жаропрочных сплавов ХН51ВМТЮКФР и ХН77ТЮР. Для примера на рис. 2 показана диаграмма усталостной прочности сплава ХН51ВМТЮКФР в зависимости от метода ППД при температуре 850 °С. Из диаграммы (рис. 2) видно, что в области А напряжений от 350 МПа и выше (соответствующая долговечность N до $8 \cdot 10^7$ ц.), наибольшей N обладают образцы, обкатанные роликами. В области В напряжений от 310 до 350 МПа (N от $8 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^8$ ц.) – образцы, имеющие сквозной наклеп оптимальной величины. А в области С напряжений менее 310 МПа (N более $5 \cdot 10^8$ ц.) – электрополированные.

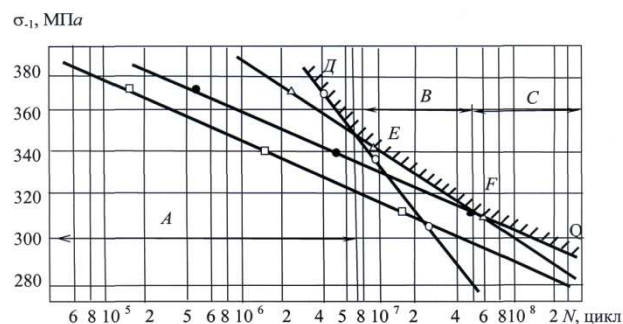


Рис. 2. Усталостная прочность сплава ХН51ВМТЮКФР в зависимости от технологии обработки при температуре испытания 850 °С:

- – электрополирование; ○ – обкатка роликами;
- – шлифование; Δ – сквозной наклеп растяжением (2,5 %)

На основе серий диаграмм для указанных сплавов, испытанных при температурах 400, 650, 800 °С и напряжениях симметричного цикла 400 и 520 МПа (с определением соответствующих значений логарифма усталостной долговечности $\lg N$), были определены *температурно-ресурсные зоны эксплуатации* этих жаропрочных сплавов. На рис. 3 показана диаграмма температурно-ресурсных зон для сплава ХН51ВМТЮКФР. Эти диаграммы показывают для конкретного сплава и условий испытаний возможность применения того или иного технологического метода обработки материалов, исходя из условий получения наиболее высоких прочностных свойств. Как видно из диаграммы (рис. 3), все возможные в реальных условиях сочетания температур и ресурсов работы деталей разделены на три зоны. В зоне *A* условия эксплуатации таковы, что поверхностная обработка существенно сказывается на работоспособности материала (эта зона соответствует достаточно низкой температуре при большом ресурсе, а при высокой температуре – малый ресурс). Поэтому для повышения долговечности деталей в этих эксплуатационных условиях эффективными окажутся технологические методы упрочнения деталей. В зоне *B* по условиям наибольшей прочности необходимо применять деформационное упрочнение оптимальной величины (поверхностное или сквозное). В зоне *C* при любых сочетаниях температуры и ресурса условия эксплуатации деталей таковы, что в силу релаксации остаточных напряжений они не оказывают заметного влияния на долговечность материала. Снижение долговечности будет происходить соответственно величине наклепанного слоя. Максимальной же долговечностью в зоне *C* будут обладать детали, поверхностный слой которых не претерпевал пластической деформации (электрополированные).

Из анализа диаграммы рис. 3 можно выдвинуть следующую гипотезу. Область *A* соответствует области МНЦУ, в которой поверхностно-пластическое деформирование (ППД) приводит к повышению N . Область *C* – соответствует области СМЦУ, в которой методы ППД неэффективны. А область *B* – переходная, соответствующая точке (области) бифуркационного перехода. Таким образом, наблюдаем область бифуркационного перехода при существенно меньших долговечностях, чем приводимые в литературе сведения для нормальных температурах испытаний.

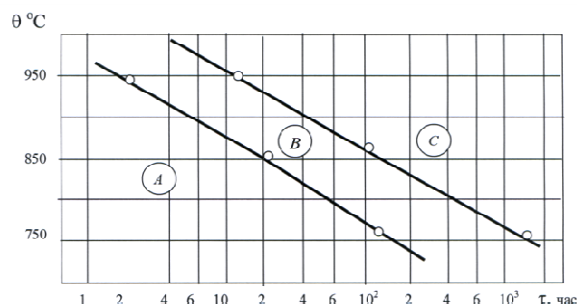


Рис. 3. Температурно-ресурсные зоны работоспособности сплава ХН51ВМТЮКФР при циклических испытаниях

Диаграмма температурно-ресурсных зон (рис. 3) по сути показывает нам *смещение указанной области бифуркационного перехода (заштрихованная область B) в область меньших долговечностей при росте температуры!*

Металлографическое исследование структуры материала поверхностного слоя разрушившихся образцов [5] показал, что работоспособность материала при высоких температурах существенно зависит от исходных свойств металла поверхностного слоя. Показано, что развитие трещин усталости в исследованных сплавах, обработанных тчением, шлифованием и испытанных при 950 °С и $\sigma_a = 240$ МПа (зона *A*) происходило из поверхностного очага. После ППД очаг усталостной трещины был также подповерхностным.

Таким образом, на основе анализа диаграмм температурно-ресурсных зон эксплуатации жаропрочных сплавов и сопоставления с современным видом кривой усталостного разрушения был сделан вывод: при росте температуры переход СМЦУ – МНЦУ происходит при меньшей долговечности [6].

Следствие этого: в области СМЦУ неэффективно применение упрочняющих методов обработки, поскольку в этом случае металл всегда разрушается из-под поверхности. С новых позиций возможно теоретическое обоснование комплекса параметров качества, требуемого по условиям эксплуатации и соответствующих технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 25.504-82 «Методы расчета характеристик сопротивления усталости».
- Шанявский А. А.** Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: ООО «Монография», 2007. 500 с.
- Терентьев В. Ф.** К вопросу о пределе выносливости металлических материалов // *Металлове-*

дение и термическая обработка металлов. 2004. № 6. С. 22–28.

4. **Шанявский А. А.** Сверхмногоцикловая усталость металла как свойство частично замкнутой самоорганизующейся системы // *Металлургия машиностроения*. 2005. № 4. С. 25–32.

5. **Мухин В. С.** Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД. М.: Наука, 2005. 296 с.

6. **Щипачев А. М.** Температурно-ресурсные зоны работоспособности жаропрочных сплавов и явление сверхмногоцикловой усталости // *ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях»*: Тр. 5-го международн. междисциплинарн. симпозиума. 17–20 ноября 2008 г. М.: МАТИ, 2008. С. 356–357.

ОБ АВТОРАХ

Щипачев Андрей Михайлович, проф. каф. технологии машиностроения. Д-р техн. наук по материаловедению в машиностроении (ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. прогнозирования характеристик усталостной прочности с учетом технологии обработки.

Мухин Виктор Сергеевич, проф. той же каф. Д-р техн. наук (МАИ, 1975). Иссл. в обл. хим. и физ.-механич. свойств поверхности деталей ГТД на различных этапах изготовления и эксплуатации; повышения прочности, надежности и долговечности деталей ГТД технологическими методами.