

## **НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Большинство современных машин и агрегатов работают в условиях переменного нагружения и высоких температур. Однако работоспособность материалов в этих условиях мало изучена. Общая теория неупругого деформирования при непропорциональном нагружении разработана недостаточно даже для обычных температур. Все это, а также трудности экспериментального характера, вызывает необходимость как всестороннего исследования свойств материалов, способных работать в этих условиях, так и разработки надежных методов оценки прочности и долговечности деталей и элементов конструкций, изготовленных из этих материалов.

Как показывают эксперименты, в зависимости от температуры характер процессов разрушения при переменном нагружении будет различным. В связи с этим не всегда ясно, какой уровень температуры считать высоким. В ряде работ предложено устанавливать высокотемпературный интервал нагружения на основе сопоставления карт механизмов деформации. На основании такого сопоставления предложено за высокую температуру считать нижнюю границу области температур, в которой явно проявляется зависимость деформации и механизма разрушения от времени. Для малоуглеродистых сталей этот эффект влияния времени деформирования проявляется при температурах выше 350–400 °С, а для аустенитных сталей 500–550 °С. Более обосновано в качестве критерия нижней области высоких температур при оценке прочностных и деформационных свойств металлических материалов применять гомологическую температуру  $M = T/T_m$  – отношение заданной абсолютной температуры  $T$  к температуре плавления  $T_m$  материала. В этом случае за условно высокую температуру может быть принято значение  $M > 0,5$ .

Анализ экспериментальных данных, опубликованных в литературе, показывает, что основные закономерности поведения материалов и накопления повреждений, свойственные малоцикловой усталости при комнатной температуре, сохраняются. Характер усталостного разрушения обусловлен неоднородностью деформации при циклическом деформировании

материалов, вследствие их структурной неоднородности, возникающей из-за различной ориентации отдельных зерен, различного характера распределения фаз, содержания легирующих элементов и других факторов. Наличие такой деформационной неоднородности приводит к неравномерному накоплению повреждений на отдельных участках циклически деформируемого материала. Первые микротрещины появляются в местах максимальных деформаций, и количество трещин при испытаниях определяется в соответствии с кривыми распределения деформаций по базе образца. С увеличением количества циклов происходит процесс рассеянного трещинообразования, интенсивность которого определяется условиями нагружения. Процесс трещинообразования приводит к возникновению магистральной трещины. Накопление усталостной поврежденности, образование и рост усталостных трещин концентрируются на поверхности испытываемых образцов.

Вместе с тем повышение температуры циклического нагружения вносит ряд особенностей, как в поведение нагружаемого материала, так и в процесс накопления повреждений при усталости. На усталостное повреждение материала большое влияние в этом случае оказывают термически активируемые процессы, такие как диффузия и ползучесть. Характерным является изменение интенсивностей процессов циклического упрочнения и разупрочнения за счет структурной нестабильности материала из-за динамического старения, реакций выделения фаз в процессе циклического деформирования, перестаривания и т.п. Эти изменения могут увеличивать или уменьшать усталостную долговечность, вследствие их существенного влияния на характеристики деформируемых материалов.

Другой особенностью является влияние на усталостную долговечность частоты нагружения или скорости деформации. Скорость деформации может существенно изменить характер разрушения. Разрушение в условиях высоких температур может иметь внутризеренный, межзеренный или смешанный характер. Кроме частоты или скорости деформации на характер разрушения влияют также форма цикла, наличие периода выдержки, окружающая среда и другие факторы. Условия перехода от одного характера разрушения к другому определяются такими механизмами микроструктурной поврежденности: окисление материалов в процессе циклического нагружения, порообразование, обусловленное процессами ползучести, изменение характера скольжения, которое определяет степень диспергирования дислокаций в процессе деформирования и рядом других механизмов.

В отличие от нагружения при нормальных температурах не всегда наблюдается четкая зависимость характеристик малоциклового усталости от деформационной способности материала.

Зависимость деформации и механизма разрушения от времени являются характерными для явления ползучести. Таким образом, можно сде-

лать вывод, что при определенных условиях циклического нагружения в области высоких температур в материале могут накапливаться повреждения, обусловленные как усталостью, так и ползучестью.

Ползучесть – процесс необратимого накопления пластических деформаций в материале, зависящий от времени деформации. Разрушение материала при ползучести носит, как и при усталости, кинетический характер. В процессе ползучести происходит исчерпание пластичности материала. Закономерность исчерпания пластичности по мере увеличения долговечности является общей для всех применяемых сплавов. Величина предельной деформации испытуемого образца до разрушения при ползучести называется длительной пластичностью. Обычно при наличии внутризеренного разрушения проявляется локализация деформации, и длительную пластичность оценивают по величине относительного сужения. В случае межзеренного разрушения оценка пластичности производится по величине относительного удлинения.

Для получения качественных и количественных характеристик высокотемпературной усталости провели исследование сопротивления малоцикловой усталости и кратковременной ползучести при высоких температурах деформируемых жаропрочных сплавов: стали 10X18H18Ю4Д аустенитного класса, применяемой для изготовления деталей для длительной работы до 1100 °C, и сплава ХН62МВКЮ применяемого для изготовления деталей, работающих при температурах до 900 °C.

Испытания в изотермических условиях проводили на установке УМЭ-10ТМ в интервале температур 200 - 900 °C на гладких цилиндрических образцах диаметром 10 мм. Нагружение жесткое, цикл пилообразный, симметричный. На этой же установке исследовалась кратковременная ползучесть сплавов при трех скоростях деформирования: 0,05, 1,0 и 10 мм/мин. Диаграммы деформирования записывали с помощью осциллографа.

В том же интервале температур проводили испытания на циклическое кручение на специализированной установке при скорости вращения активного захвата 10 мин<sup>-1</sup>.

Сопротивление материала малоцикловой усталости оценивали по числу циклов до разрушения  $N$ .

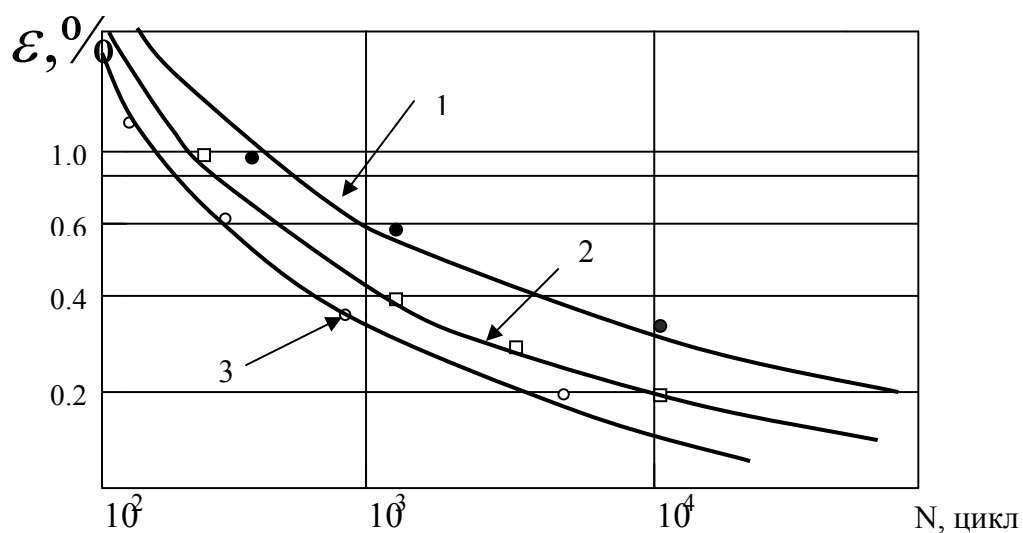


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости сплава ХН62МВКЮ для изотермических режимов нагружения при температурах: 1 – 200 °C; 2 – 500 °C; 3 – 850 °C

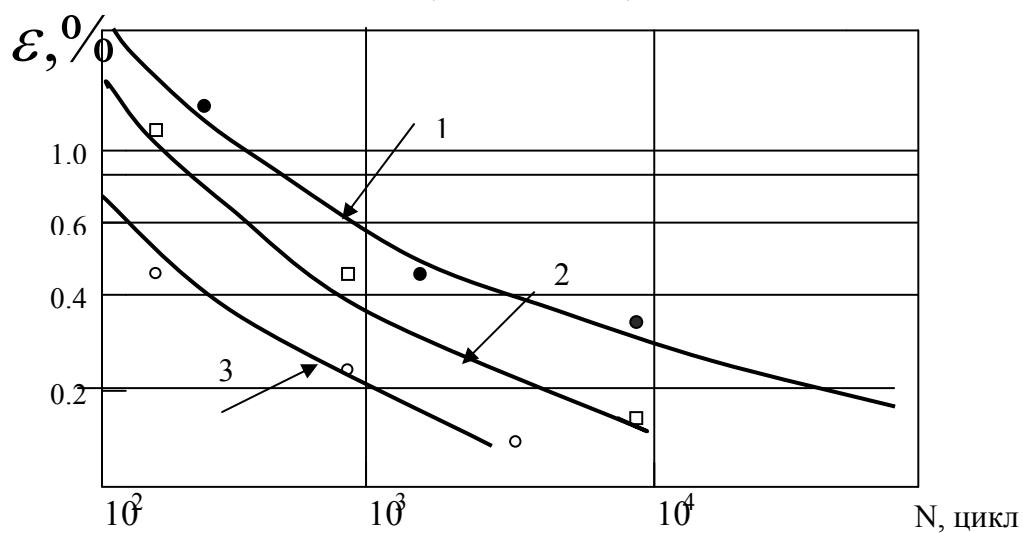


Рис. 2. Кривые малоциклового усталости сплава ХН62МВКЮ при температуре 500 °C и скоростях деформирования: 1 – 10; 2 – 1,0; 3 – 0,05 мм/мин.

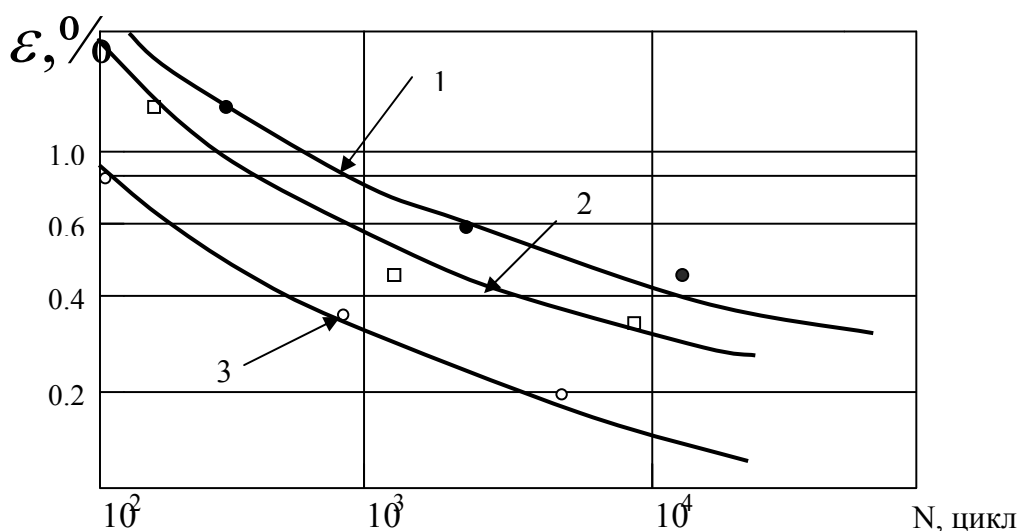


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости стали 10X18H18Ю4Д для изотермических режимов нагружения при температурах:

1 – 200 °C; 2 – 500 °C; 3 – 850 °C

Анализ поверхности разрушения показал, что при температурах примерно до 550–650 °C в условиях изотермического циклического деформирования разрушение носит внутризеренный или смешанный характер, при более высоких температурах характер разрушения межзеренный, что указывает на проявление процесса ползучести. Характер разрушения определяется также скоростью деформации при соответствующих температурах. Расчетные кривые малоциклового усталости, полученные по соотношению (1) оказались близки к экспериментальным. При этом предполагалось, что в выбранном диапазоне скоростей деформации, повреждение происходит только в полупереме растяжения. Переход к межзеренному разрушению или наличие процессов ползучести ведет к снижению долговечности сплавов.

Для оценки поврежденности при циклическом нагружении с проявлением ползучести вводится модель накопления повреждений, основанная на введении скалярного параметра поврежденности  $\omega$ . Модель является частным случаем общей феноменологической модели разрушения, предложенной в работе [3].

$$d\omega/dt = C \cdot \dot{P}_i / [(1 - \omega_i)^{\alpha_i} \cdot \Lambda_p];$$

$$\omega_i = \omega_{i0} \quad \text{при} \quad t = t_{i-1};$$

$$\Lambda_p = \Lambda_p(\dot{P}, \kappa, \theta, \chi);$$

$$\alpha_i = \alpha_i(\dot{P}, \kappa, \theta, \chi);$$

$$\Omega = A \left[ \sum_{i=1}^{N_p} \omega_i \right]^b;$$

$$\Omega \geq 1,$$

где  $i$  – номер цикла;  $\omega_i$  – поврежденность за цикл;  $\Omega$  – общая поврежденность за  $N_p$  циклов до разрушения;  $\Lambda_p$  – пластичность материала;  $A$  и  $b$  – опытные константы.

Если предположить, что циклическая долговечность сплавов при высоких температурах определяется их деформационной способностью, как при нормальных температурах, то процесс снижения пластичности в условиях появления ползучести при постоянной скорости деформации, можно, очевидно, описать уравнением, подобным соотношению, предложенному в работе для одноосного нагружения [4]

$$\Lambda_{p\tau} = \Lambda_p \left( \frac{\xi}{B} \right)^{-m},$$

где  $\Lambda_{p\tau}$  – пластичность сплава при циклическом деформировании при высокой температуре;  $\Lambda_p$  – пластичность сплава;  $\xi$  – скорость деформации;  $B$  и  $m$  – коэффициенты.

Максимально возможное снижение долговечности при появлении процессов ползучести можно оценить соотношением

$$N_\tau = cN,$$

где  $c = \frac{\Lambda_{дп}}{\Lambda_p}$ , здесь  $\Lambda_{дп}$  – минимальная длительная пластичность.

Однако высказанные положения нуждаются в более широкой проверке.

### Список использованных источников

1. Усталость при высоких температурах / под ред. С. Свенсона : пер. с англ. М.: Металлургия, 1995. 149 с.
2. Махутов Н.А. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении / Н.А. Махутов, А.З. Воробьёв, М.М. Гаденин [и др.]. М.: Наука, 1983. 272 с.
3. Колмогоров В.Л., Мигачёв Б.А., Бурдуковский В.Г. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения. Екатеринбург: УрО РАН, 1994. 104 с.
4. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. 252 с.