

УДК 620.178.3

М.Б. МИЛЕШКИН, И.В. БИБЛИК*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

В рамках специального расчетно-экспериментального метода, основанного на компьютерном моделировании механического поведения материалов и элементов конструкций, рассмотрен новый подход к оценке влияния состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность жаропрочных сплавов, используемых для изготовления деталей ГТД. Показано, что разработанный подход позволяет учитывать влияние на сопротивление усталости таких характеристик качества поверхностного слоя как наличие и характер распределения остаточных напряжений сжатия, шероховатости и поверхностного наклепа.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, поверхностный слой, остаточные напряжения, наклеп, шероховатость, циклическая долговечность, предел выносливости

Введение и постановка задачи

В общем случае кинетический процесс разрушения является достаточно сложным – многостадийным, статистическим и многомасштабным [1]. Одним из наиболее сложных и опасных видов разрушения является усталостное разрушение.

Проблема количественного моделирования кинетики процесса усталостного разрушения еще далека от своего завершения. Одной из достаточно удачных попыток такого моделирования может служить разработанный в ИПМаш НАН Украины специальный расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) [2,3], который позволил решить в рамках общей модели прочностной надежности целый ряд задач, в том числе и некоторые вопросы усталостного разрушения.

В основе РЭМ заложены некоторые положения системной динамики [4] и имитационного компьютерного моделирования. Кроме того, он базируется на экспериментальном определении механических характеристик материала элементов конструкций с учетом режима и условий эксплуатации.

В качестве уровня состояния системы до настоящего времени использовался запас деформативности структурных элементов, исчерпание которого приводит к последовательному разрушению соседних структурных элементов и развитию процесса разрушения.

Такой подход был применен и к моделированию процесса многоциклового усталости. Дальнейшее развитие этого направления показало, что РЭМ требует некоторой модернизации.

Во-первых, специфический процесс многоциклового усталости протекает без заметных пластических деформаций, хотя в микроскопическом плане происходит протекание различных дислокационных процессов. Во-вторых, на процесс многоциклового усталости оказывает существенное влияние большое количество различных факторов, учесть влияние которых в рамках деформационного подхода не всегда удается. В-третьих, давно назрела необходимость использования в качестве одной из характеристик структурных элементов в модели материала модуля упругости структурного элемента в направлении приложения нагрузки.

Это объясняется следующим.

Во-первых, модуль упругости является мерой сил межатомных связей. А ведь в физическом плане разрушение – это процесс ослабления и разрыва межатомных связей.

Во-вторых, модуль упругости является практически структурно нечувствительной характеристикой. Существенное изменение модуля упругости происходит лишь с повышением температуры эксплуатации. Поэтому «присутствие» в модели материала такой характеристики особенно актуально для решения задач оценки работоспособности и долговечности материалов элементов оборудования, работающих в условиях высоких температур.

В-третьих, анизотропия модулей упругости в монокристаллах создает предпосылки для развития процесса разрушения в поликристалле. Хорошо известна зависимость модуля упругости от кристаллографического направления в монокристаллах. Но, что интересно, наличие большого числа хаотично

ориентированных мелких кристаллитов (зерен) в поликристалле в большинстве случаев делает его изотропным.

Локальная анизотропия может являться фундаментальной причиной процесса усталости, поскольку при совместности деформации в различно ориентированных по отношению к оси нагружения (будем рассматривать случай одноосного нагружения) зерна будут возникать различные напряжения, а следовательно разной будет и их циклическая долговечность.

Это «локальное нарушение равновесия» между мезообъемами может рассматриваться как универсальная причина усталостного разрушения конструкционных материалов. Действительно, усталости подвержены металлы и сплавы, металлические и полимерные композиты, конструкционная керамика.

Все вышперечисленное и послужило основой для разработки энергодеформационного подхода к оценке циклической долговечности.

1. Энергодеформационный подход к оценке циклической долговечности

В литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию деформационных и энергетических моделей [5] и критериев [6] усталостного разрушения металлов.

Обычно в основе деформационных и энергетических критериев лежит явление, называемое неупругостью [6], которое определяется энергией, расходуемой в металле на необратимые процессы, т.е. практически речь идет о запасенной энергии.

В основе разработанного энергодеформационного подхода лежит создание модели материала, структурные элементы которой первоначально уже имеют «запас энергии» (уровень состояния системы), который затем расходуется в процессе компьютерного циклического нагружения.

В энергодеформационном подходе используется переход от двух интегральных механических характеристик материала – предельной деформации и модуля упругости – к функции распределения этих характеристик по структурным элементам.

На рис. 1 в качестве примера модели материала сплава ВТ20 представлены пять столбцов и две строки массива структурных элементов (обычно при расчетах использовались массивы 300x300). Каждому структурному элементу присваивались значения предельной деформации и модуля нормальной упругости, которые задавались по нормальному распределению на основе справочных данных. Так, например, для титанового сплава ВТ20 предельные деформации задавались в интервале 0,02 – 0,14 с максимумом при 0,08 (значения на рисунке изобра-

жены жирным шрифтом), а модули нормальной упругости – в интервале $5 \cdot 10^4$ – $15 \cdot 10^4$ МПа.

0,08	0,09	0,06	0,04	0,045
110000	100000	125000	80000	95000
0,115	0,055	0,10	0,075	0,093
91000	74000	140000	131000	115000

Рис. 1. Пример модели материала в энергодеформационном подходе

При этом отметим, что для исходного материала распределение можно получить прямым экспериментальным путем. Однако для материалов элементов конструкций, находящихся в эксплуатации, определение параметров распределения возможно только с учетом как непосредственных измерений, так и результатов лабораторного исследования образцов после различных эксплуатационных воздействий.

Для проверки сохранения изотропности материала на макроуровне при таком способе задания модулей нормальной упругости проводилось определение среднего модуля упругости по столбцам и строкам массива. Оказалось, что величина среднего модуля упругости изменяется всего на 2,5–5 % (в зависимости от размерности массива).

Модель разрушения в РЭМ представляет собой имитационное развитие процесса разрушения. При этом предполагается, что весь «запас пластичности» будет исчерпан в упругой области. Кратко проиллюстрируем это.

Как уже отмечалось, каждый i -й структурный элемент массива имеет «запас энергии», который определяется как

$$U_i = \frac{1}{2} E_i \varepsilon_{i\text{пред}}^2,$$

где E_i – модуль упругости i -ого структурного элемента;

$\varepsilon_{i\text{пред}}$ – предельная деформация i -ого структурного элемента.

Для компьютерного циклического нагружения определяем шаг нагружения $\Delta \varepsilon$ для выбранной амплитуды циклического нагружения σ_A

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_A}{E},$$

где E – средний модуль упругости (максимум нормального распределения).

На каждом шаге нагружения для каждого структурного элемента уменьшаем значение U_i на величину

$$\Delta U_i = \frac{1}{2} E_i \Delta \varepsilon^2.$$

Если при этом для какого-либо элемента массива значение U_i оказывается меньше или равным 0, то этот элемент считается разрушенным, соседние с ним элементы дополнительно "исчерпывают свой запас энергии" на этом же шаге и так до тех пор, пока после очередного анализа массива число вновь разрушившихся элементов не будет равно 0.

Затем производится следующий шаг и так до полного разрушения образца, которому соответствует "прохождение трещины" через все структурные элементы в каком либо сечении.

2. Результаты исследования

Хорошо известно, что величина предела выносливости очень сильно зависит от параметров состояния поверхностного слоя [7,8]. Условия работы и эксплуатационная нагруженность таких деталей ГТД, как лопатки, диски и др., заставляет предъявлять к материалам и свойствам поверхностного слоя очень высокие требования.

В настоящей работе энергодеформационный подход был применен для оценки влияния на циклическую долговечность некоторых параметров состояния поверхностного слоя.

2.1. Влияние остаточных напряжений на циклическую долговечность

Для повышения несущей способности деталей ГТД широко применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), позволяющие регулировать свойства поверхностного слоя.

Многочисленными исследованиями установлено, что в результате применения методов упрочняющей обработки на основе ППД в поверхностном слое создаются благоприятные остаточные напряжения сжатия при соответствующей степени деформационного упрочнения.

Однако использование ППД для деталей ГТД, работающих при повышенных температурах, имеет свои ограничения. Наиболее оптимальными для них являются методы упрочнения, которые обеспечивают в поверхностном слое детали благоприятное напряженное состояние при минимальной степени упрочнения. Одним из таких методов является термопластическое упрочнение (ТПУ) [9], которое позволяет не только снимать растягивающие напряжения, но и получать в поверхностном слое благоприятные остаточные напряжения сжатия.

На рис. 2 показано изменение остаточных напряжений сжатия ($\sigma_{пов}$) с максимумом на поверхности в образцах из сплава ВТ20 после ТПУ [10]. Эти данные были использованы при компьютерном моделировании усталостного поведения этих образцов. Задание в модель разрушения остаточных напряже-

ний сжатия по глубине поверхностного слоя происходило в соответствии с этой кривой. Размер структурного элемента выбирался равным 25 мкм. Для структурных элементов поверхностного слоя глубиной 200 мкм шаг нагружения корректировался на величину остаточных напряжений и составлял

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_A - \sigma_{пов}}{E}$$

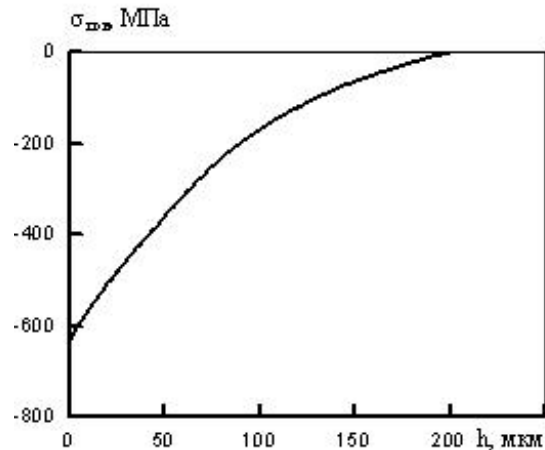


Рис. 2. Изменение остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое (h – расстояние от поверхности)

На рис. 3 приведены кривые усталости, полученные экспериментально на образцах из сплава ВТ20 [10] (изображены серым цветом), и кривые усталости, полученные при компьютерном моделировании (изображены черным цветом). Видно, что зависимости практически совпадают. Предел выносливости на базе $5 \cdot 10^6$ циклов для образцов после ТПУ составляет 425 МПа и на 25 % превышает предел выносливости для неупрочненных образцов.

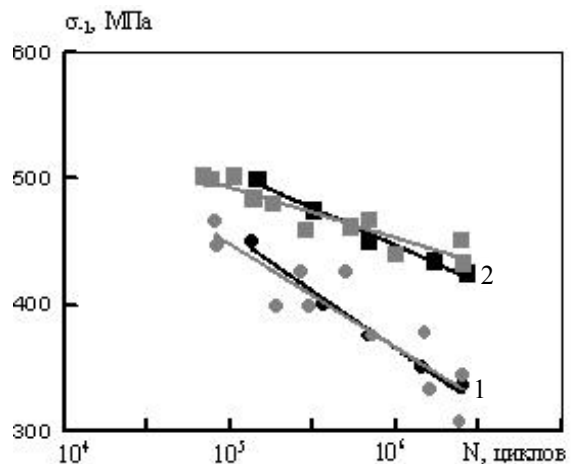


Рис. 3. Усталостная прочность образцов из сплава ВТ-20:
1 – исходные образцы;
2 – образцы после ТПУ

2.2. Влияние поверхностного наклепа на циклическую долговечность

Поверхностный наклеп возникает после механической обработки детали и характеризуется глубиной и степенью наклепа [11].

Для деталей из жаропрочных сплавов, работающих при высоких температурах, оптимальным по усталостной прочности будет поверхностный слой с незначительным деформационным упрочнением. Поэтому при оценке влияния поверхностного наклепа на циклическую долговечность была выбрана остаточная деформация, равная 1 %.

На рис. 4 показана зависимость предела выносливости образцов сплава ЭИ617 при температуре 800 °С от глубины наклепа (h_n), полученная с помощью компьютерного моделирования.

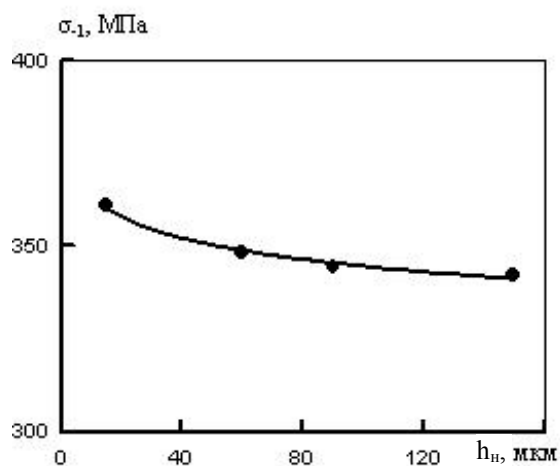


Рис. 4. Влияние глубины наклепа поверхности на предел выносливости сплава ЭИ617

Полученная зависимость предела выносливости от глубины наклепа описывается уравнением

$$\sigma_{-1} = 384,2h^{-0,024},$$

а коэффициент и показатель степени показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными [11].

2.3. Влияние шероховатости поверхности на циклическую долговечность

Для оценки влияния шероховатости поверхности на циклическую долговечность с помощью компьютерного моделирования также были выбраны образцы из сплава ЭИ617 с различной высотой микронеровностей.

На рис. 5 приведена зависимость предела выносливости образцов при температуре 800 °С для различных значений параметра шероховатости R_a , представляющего собой среднее арифметическое отклонение профиля микронеоднородностей.

Видно, что при увеличении параметра шероховатости R_a величина предела выносливости падает,

что обусловлено увеличением размеров концентраторов напряжений и подтверждается результатами других исследований, например [11].

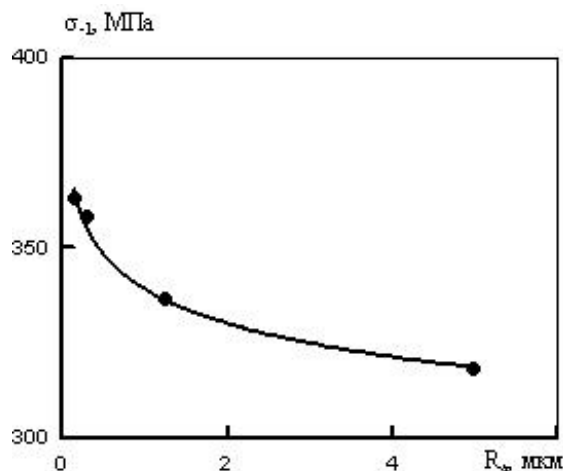


Рис. 5. Влияние шероховатости поверхности на предел выносливости сплава ЭИ617

Полученная зависимость предела выносливости от параметра шероховатости R_a описывается уравнением

$$\sigma_{-1} = 339R_a^{-0,039},$$

а коэффициент и показатель степени также показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными [11].

Выводы

В рамках РЭМ разработан новый энергодеформационный подход.

Этот подход использован для оценки влияния некоторых параметров состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность жаропрочных сплавов, используемых для изготовления деталей ГТД.

Исследовано влияние остаточных напряжений сжатия, поверхностного наклепа и шероховатости на сопротивление усталости двух жаропрочных сплавов.

Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными. Получено хорошее совпадение.

С помощью разработанного подхода в дальнейшем предполагается провести комплексную оценку влияния параметров состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность и определить возможность оптимального повышения сопротивления усталости.

Литература

1. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

2. Милешкин М.Б. Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений. – К., 2006. – Вып. 26. – С. 302-310.

3. Милешкин М.Б. Применение компьютерного моделирования для оценки усталостной повреждаемости жаропрочных сплавов при многофакторном нагружении / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // *Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials – DFMN 2007: book of articles*. – М., 2007. – С. 653-655.

4. Форрестер Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 168 с.

5. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие. Ч. II. / В.Т. Троценко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский, Л.А. Сосновский, В.А. Стрижало. – К.: Наукова думка, 1994. – 702 с.

6. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов / В.Т. Троценко. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.

7. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А.Н. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

8. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

9. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машигиз, 1963. – 231 с.

10. Вишняков М.А. Применение характеристик ка-чества поверхности высоконагруженных деталей / Вишняков М.А., Кравченко Б.А. – Инженерный журнал: справочник. – 2002. – № 12. – С. 15-18.

11. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.

Поступила в редакцию 1.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

НОВИЙ ПІДХІД ДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ

М.Б. Милешкин, І.В. Библик

У рамках спеціального розрахунково-експериментального методу, заснованого на комп'ютерному моделюванні механічної поведінки матеріалів і елементів конструкцій, розглянуто новий підхід до оцінки впливу стану поверхневого шару на циклічну довговічність жароміцних сплавів, що використовуються для виготовлення деталей ГТД. Показано, що розроблений підхід дозволяє враховувати вплив на опір втомі таких характеристик якості поверхневого шару як наявність і характер розподілу залишкових напружень стиску, шорсткості і поверхневого наклепу.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, поверхневий шар, залишкові напруження, наклеп, шорсткість, циклічна довговічність, межа витривалості.

THE NEW APPROACH TO APPLICATION OF COMPUTER MODELLING FOR AN ESTIMATION OF INFLUENCE OF SURFACE LAYER CONDITION ON FATIGUE LIFE

M.B. Mileshkin, I.V. Biblik

Within the framework of the special design-experimental method based on computer modelling of mechanical behaviour of materials and elements of designs, the new approach to an estimation of influence of surface layer condition on fatigue life of heat resisting alloys used for manufacturing of gas turbine engine details is considered. It is shown, that the developed approach allows to take into account influence of such characteristics of surface layer quality as presence and character of distribution of residual compression, surface roughness and hardening on fatigue resistance.

Key words: computer modelling, surface layer, residual stresses, surface hardening, roughness, fatigue life, fatigue limit.

Милешкин Михаил Борисович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.

Библик Ирина Валентиновна – главный инженер-исследователь отдела материаловедения Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.