

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гецов Л.Б., Мельников Б.Е., Семенов А.С.

Санкт-Петербургский технический университет
e-mail: Leonid@Guetsov.spb.ru, melnikov@resurs.hop.stu.neva.ru

Рассматривается алгоритм реализации многомодельного метода решения практических задач при произвольных программах нагружения с помощью конечно-элементных пакетов для определения наиболее экономными для вычислений средствами напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций из различных металлических материалов. Разработаны классификатор материалов, классификатор условий нагружения и перечень базовых экспериментов для использования различных моделей термоупруговязкопластичности и ползучести. Использование этих классификаторов для установления иерархии моделей является первым шагом на пути внедрения многомодельного анализа конструкций в расчетную практику.

Повышение точности расчетов напряженно-деформированного состояния и запасов прочности деталей с помощью современных конечно-элементных пакетов (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, LUSAS, MARC и др.) может быть обеспечено только при использовании адекватных для рассматриваемых условий нагружения теорий пластичности и ползучести (теорий термоупруговязкопластичности) и достоверной информации о свойствах материалов, в том числе отражающей их изменение при длительной эксплуатации.¹⁾ Учеными стран СНГ, США и стран европейского содружества разработано сравнительно большое число моделей механического поведения материалов, алгоритмов и программ для их использования в расчетах напряженно-деформированного состояния деталей. Однако в настоящее время пользователям конечно-элементных пакетов как правило неизвестны области применения различных теорий (моделей), позволяющих адекватно рассчитывать напряженно-деформированное состояние деталей при всем практически реализуемом в машиностроительных конструкциях многообразии условий нагружения.

Что касается универсальных теорий термоупруговязкопластичности, то следует признать, что такие в настоящее время отсутствуют – даже наиболее совершенные не могут гарантировать возможности адекватного описания процессов деформирования любых твердых тел при произвольных программах нагружения.

Следует также отметить, что закономерности поведения различных материалов, в том числе металлических разных классов, могут существенно отличаться. Особенно это относится к взаимному влиянию процессов ползучести и пластического деформирования.

В настоящем сообщении делается попытка дальнейшего развития разработанного в [1,2] многомодельного метода решения практических задач с помощью конечно-

¹⁾ В связи с существующей терминологической путаницей в дальнейшем под термином "вязкость" будем понимать свойство материала, а под термином "ползучесть" - явление накопления деформаций с течением времени.

элементных пакетов, позволяющих проводить решения задач по определению напряженно-деформированного состояния наиболее экономными для вычислений средствами и в то же время обеспечивая адекватность полученных результатов.

Стратегия рассматриваемого ниже многомодельного анализа состоит из следующих направлений:

- создание библиотеки моделей термоупруговязкопластичности;
- определение системы критериев выбора моделей в связи с особенностями материала, геометрии рассматриваемой конструкции и, главное, условий ее нагружения;
- создание базы данных по характеристикам материалов, используемых как базовые для проведения соответствующих расчетов;
- проведение многовариантных уточняющих расчетов, определяющих области адекватного применения разных моделей и их иерархию с позиций экономии машинного времени.

Исходя из этой стратегии, авторами были разработаны классификатор материалов, классификатор условий нагружения и перечень базовых экспериментов для использования различных моделей. При этом в число рассматриваемых не включались задачи линейной и нелинейной механики разрушения. Использование этих классификаторов для установления иерархии моделей является по нашему мнению первым шагом для внедрения многомодельного анализа конструкций в расчетную практику.

1. Классификация теорий (моделей)

Ниже приведен перечень современных теорий ползучести и упруговязкопластического деформирования, используемых для расчета напряженно-деформированного состояния деталей машин, в том числе при сложных программах нагружения. В их число включены, в том числе, модели, позволяющие описать все три стадии ползучести при постоянных и меняющихся температурах, а также влияние на процесс деформирования накапливаемых повреждений. По мнению авторов заслуживает внимания следующий перечень моделей:

- 1.1. Классические теории ползучести
 - 1.1.1. Теория постоянной скорости,
 - 1.1.2. Теория старения,
 - 1.1.3. Теория течения,
 - 1.1.4. Теория упрочнения,
 - 1.1.5. Теория наследственности,
 - 1.1.6. Смешанные теории
- 1.2. Деформационная теория пластичности,
- 1.3. Теории пластического течения
 - 1.3.1. Линейная изотропная,
 - 1.3.2. Нелинейная изотропная,
 - 1.3.3. Кинематическая,
 - 1.3.4. Изотропно-кинематического упрочнения
- 1.4. Теория скольжения (Батдорф, Будянский),
- 1.5. Физические теории пластичности (Тейлор, Лин и др.),
- 1.6. Теория упругопластических процессов (Илюшин),
- 1.7. Структурно-аналитическая теория (Лихачев),
- 1.8. Теория Пыжина (Пыжин, Угодчиков, Коротких),
- 1.9. Теория микронапряжений (Новожилов, Кадашевич),

- 1.10. Теория микродеформаций (Пальмов),
- 1.11. Теория микронапряжений с перекрестными связями,
- 1.12. Многоповерхностная теория пластичности,
- 1.13. Модель множественных механизмов (Каето),
- 1.14. Теория ползучести (Боднер-Партон),
- 1.15. Теория нелинейного кинематического упрочнения (Шабош),
- 1.16. Модели термовязкоупругопластичности (Шевченко),
- 1.17. Эндохронная теория,
- 1.18. Реологические модели (Садаков, Кадашевич и др.),
- 1.19. Полумикроскопическая теория пластичности (Христианович и др.),
- 1.20. Модифицированная теория упрочнения при ползучести с учетом повреждений в процессе деформирования (Гецов).

Приведенный перечень не претендует на полноту. С определяющими уравнениями, базовыми экспериментами, необходимыми для определения параметров, методиками расчета частных случаев и данными по проверке адекватности можно ознакомиться в монографиях [3-12].

2. Виды материалов

Рассмотрим вопросы классификации металлических материалов, оставляя вне поля зрения керамические и композитные материалы. В связи с использованием в конструкциях разнообразных марок металлических материалов, к тому же изготавливаемых в разных странах, и тем, что их характеристики в полном объеме, как правило, неизвестны, ниже приводится их классификация, предпочтительная с позиций авторов.

2.1. Классификация по степени гомогенности

2.1.1. Гомогенные,

2.1.2. Гетерогенные

2.1.2.1. С упрочняющей(упрочняющими) фазой (фазами),

2.1.2.2. Композитные

2.2. Классификация по химическому составу

2.2.1. Перлитные малоуглеродистые стали

2.2.2. Перлитные среднеуглеродистые стали

2.2.3. Перлитные высокоуглеродистые стали

2.2.4. Чугуны

2.2.5. Мартенситные стали

2.2.6. Аустенитные стали

2.2.7. Сплавы на никелевой основе

2.2.8. Титановые сплавы

2.2.9. Алюминиевые сплавы

2.2.10. Медные сплавы

2.2.11. Магниевого сплавы

2.3. Классификация по уровню прочности (σ_B) и пластичности (δ, ψ) при комнатной температуре

2.3.1. Повышенной пластичности,

2.3.2. Средней прочности,

2.3.3. Высокопрочные,

2.3.4. Хрупкие

2.4. Классификация по особенностям упругопластического поведения при циклическом нагружении.

- 2.4.1. Циклически упрочняемые (при данной температуре),
- 2.4.2. Циклически разупрочняемые (при данной температуре),
- 2.4.3. Циклически стабильные (при данной температуре),
- 2.4.4. С переменным поведением в процессе деформирования

2.5. Классификация по ориентационной зависимости свойств в исходном состоянии

- 2.5.1. Изотропные,
- 2.5.2. Анизотропные
 - 2.5.2.1. Анизотропные поликристаллические,
 - 2.5.2.2. Направленной кристаллизации,
 - 2.5.2.3. Монокристаллические.

2.6. Классификация по ориентационной зависимости свойств в процессе деформирования

- 2.6.1. Со свойствами деформационной изотропии,
- 2.6.2. Со свойствами деформационной анизотропии

2.7. Классификация по структурной стабильности (в процессе эксплуатации)

- 2.7.1. Структурно-стабильные,
- 2.7.2. Структурно-нестабильные.

3. Классификация условий нагружения

Ниже рассматривается классификатор возможных условий нагружения твердого тела. Привязав его к возможностям различных теорий, получаем способ выбора моделей, способных адекватно прогнозировать напряженно-деформированное состояние конструкции при известных условиях ее нагружения во время эксплуатации (т.е. при известной эксплуатационной модели).

3.1. Одноосное напряженное состояние

3.1.1. Классификация по направлению приложения нагрузки

- 3.1.1.1. Знакопостоянное при постоянной нагрузке,
- 3.1.1.2. Знакопостоянное при изменяющейся нагрузке,
- 3.1.1.3. Знакопеременное.

3.1.2. Классификация по температурному режиму нагружения

- 3.1.2.1. Изотермическое,
- 3.1.2.2. Неизотермическое.

3.1.3. Классификация по виду нагружения

- 3.1.3.1. Жесткое (с заданной полной деформацией),
- 3.1.3.2. Мягкое (с заданной нагрузкой),
- 3.1.3.3. С переменной жесткостью.

3.1.4. Классификация по характеру деформирования

- 3.1.4.1. В упругой области,
- 3.1.4.2. В условиях ползучести без пластической деформации,
- 3.1.4.3. В упруго-пластической области без ползучести,
- 3.1.4.4. В упруго-пластической области с ползучестью.

3.1.5. Классификация по характеру (циклическости) приложения нагрузки

- 3.1.5.1. Неизменяющееся во времени,
- 3.1.5.2. Изменяющееся во времени,
 - 3.1.5.2.1. Стационарное нециклическое,
 - 3.1.5.2.2. Циклическое при симметричном цикле,

3.1.5.2.3. Циклическое при асимметричном цикле,

3.1.5.2.4. Циклическое с переменными параметрами цикла.

3.1.6. *Классификация по однородности напряженного состояния*

3.1.6.1. Однородное (при постоянных напряжениях по сечению),

3.1.6.2. Неоднородное (при переменных напряжениях по сечению).

3.2. Сложное напряженное состояние

3.2.1. *Классификация по температурному режиму*

3.2.1.1. Изотермическое,

3.2.1.2. Неизотермическое.

3.2.2. *Классификация по жесткости напряженного состояния (параметры жесткости напряженного состояния: σ_1/σ_i , угол наклона траектории нагружения к оси максимального напряжения)*

3.2.2.1. Двухосное

3.2.2.1.1. Двухосное растяжение,

3.2.2.1.2. Двухосное сжатие,

3.2.2.1.3. Двухосное комбинированное напряженное состояние.

3.2.2.2. Трехосное

3.2.2.2.1. Трехосное растяжение,

3.2.2.2.2. Трехосное сжатие,

3.2.2.2.3. Трехосное комбинированное напряженное состояние

3.2.3. *Классификация по характеру деформирования*

3.2.3.1. В упругой области,

3.2.3.2. В условиях ползучести без пластических деформаций,

3.2.3.3. В упруго-пластической области без ползучести,

3.2.3.4. В упруго-пластической области с ползучестью.

3.2.4. *Классификация по характеру (циклическости) приложения нагрузки*

3.2.4.1. Неизменяющееся во времени,

3.2.4.2. Изменяющееся во времени

3.2.4.2.1. Стационарное нециклическое пропорциональное,

3.2.4.2.2. Стационарное нециклическое непропорциональное (с поворотом осей главных осей тензора напряжений во время нагружения),

3.2.4.2.3. Циклическое

3.2.4.2.3.1. Виды цикла: простой (пропорциональный при симметричном цикле) и сложный (пропорциональный при асимметричном цикле; непропорциональный при симметричном и асимметричном цикле),

3.2.4.2.3.2. Циклическое пропорциональное при симметричном цикле,

3.2.4.2.3.3. Циклическое пропорциональное при асимметричном цикле

3.2.4.2.4. С переменным поведением в процессе деформирования

3.2.5. *Классификация по виду нагружения*

3.2.5.1. Жесткое – обусловленное шаровой частью,

3.2.5.2. Мягкое – обусловленное девиатором напряжений,

3.2.5.3. С переменной жесткостью.

3.2.6. Классификация по наличию концентраторов напряжений

3.2.6.1. Без концентраторов напряжений (деформаций),

3.2.6.2. С концентраторами напряжений (деформаций)

3.2.6.2.1. С геометрическими концентраторами,

3.2.6.2.2. С трещинами,

3.2.6.2.2.1. Единичными,

3.2.6.2.2.2. Неединичными,

3.2.6.2.2.3. Макротрещинами,

3.2.6.2.2.4. Микротрещинами,

3.2.6.2.2.5. Короткими трещинами.

3.2.7. Классификация по виду траектории деформирования

3.2.7.1. С траекторией нулевой кривизны (с прямолинейной траекторией деформирования)

3.2.7.2. С криволинейной траекторией деформирования

3.2.7.2.1. С очень малой кривизной,

3.2.7.2.2. С малой кривизной,

3.2.7.2.3. Со средней кривизной,

3.2.7.2.4. С мгновенной кривизной (в точках излома),

3.2.7.2.5. Сложное пассивное нагружение,

3.2.7.2.6. Многозвенные пространственные траектории

3.2.7.2.6.1. Двухзвенная ломаная траектория,

3.2.7.2.6.2. Трехзвенная ломаная траектория,

3.2.7.2.6.3. Замкнутая криволинейная траектория,

3.2.7.2.6.4. Многозвенная ломаная траектория.

3.2.8. Классификация по величине полных деформаций

3.2.8.1. Малые деформации

3.2.8.2. Большие деформации

4. Базовые эксперименты

Использование разных моделей требует знания различных характеристик материала, определяемых из простых опытов. К их числу относятся:

4.1. Кривая растяжения при мгновенном нагружении в координатах σ - ϵ при температурах T_i ($i = 1 \dots n$);

4.2. Изохронные кривые деформирования в координатах σ - ϵ при температурах T_i ($i = 1 \dots n$) для $\tau = 0 \dots \tau_n$, построенные по данным испытаний на ползучесть при постоянных $\sigma = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$;

4.3. Значения статического модуля упругости при температурах T_i ($i = 1 \dots n$);

4.4. Значения коэффициентов линейного расширения в интервале $20-T_i$ ($i = 1 \dots n$);

4.5. Предельные значения пластичности при мгновенном растяжении при температурах T_i ($i = 1 \dots n$);

4.6. Предельные значения пластичности при ползучести при температурах T_i ($i = 1 \dots n$) как функция времени до разрушения;

4.7. Характеристики анизотропии

4.7.1. Механических свойств,

4.7.2. Сопротивления ползучести,

4.7.3. Модуля упругости,

4.7.4. Сопротивления деформированию,

4.7.5. Сопротивление циклическому деформированию.

- 4.8. Влияние предварительной пластической деформации на скорость ползучести при температурах $T_i (i = 1..n)$;
- 4.9. Сопротивление циклическому деформированию при температурах $T_i (i = 1..n)$;
- 4.10. Сопротивление циклической ползучести при знакопеременном нагружении при температурах $T_i (i = 1..n)$;
- 4.11. Сопротивление деформированию при двухзвенной траектории деформирования.

Кроме того, для проведения расчетов необходимо иметь в распоряжении значения коэффициента Пуассона в упругой области, модуля сдвига (одно значение при температуре T или массив), плотности, предельных напряжений при растяжении, при сжатии, при срезе (одно значение при температуре T или массивы), твердости.

В практике расчетов на прочность целесообразно принимать в качестве *предельных напряжений при растяжении*: для упругих расчетов при низких температурах - предел текучести при комнатной температуре и предел текучести при комнатной температуре, умноженный на коэффициент учета влияния температуры; для расчетов при высоких температурах – предел длительной прочности, отвечающий заданным времени эксплуатации и температуре; в качестве *предельных напряжений при сжатии* – соответствующие значения при растяжении; *предельных напряжений при срезе* применительно к условию Треска – соответствующие значения при растяжении, умноженные на 0,7, а применительно к условиям Мизеса – соответствующие значения при растяжении, умноженные на 0,577.

5. Области применения теорий

В рамках данного сообщения делается попытка на качественном уровне определить область применения перспективных (из попавших в поле зрения авторов) теорий из числа, перечисленных в п.1, к различным материалам (п.2) и ситуациям, рассмотренным в п.3.

Установлено, что применение даже наиболее совершенных теорий не позволяет признать их по отдельности универсальными. Они либо нуждаются в усовершенствовании, либо, для решения всего многообразия задач (согласно рассмотренного выше классификатора условий нагружения), которое может иметь место в реальных конструкциях, такая универсальность становится возможной лишь при использовании многомодельного подхода.

Следует отметить, что для решения задач, вообще говоря, используются различные методы аппроксимации экспериментальных данных по свойствам материалов. Особенно это относится к данным по ползучести. Так, в пакет ANSYS включены более десяти формул для определения скорости ползучести на разных ее стадиях. К сожалению, во многих случаях ограниченное количество экспериментальных данных не позволяет использовать в расчетах характеристики, полученные в результате их статистической обработки. По этой же причине затруднено представление экспериментальных данных с помощью стандартного набора формул и в ряде случаев следует отдать предпочтение данным, заданным точно. Рассмотрение этих вопросов выходит за рамки настоящего сообщения.

На основе количественного анализа применимости различных моделей к различным материалам и условиям нагружения (п.1 и 2) с использованием библиотеки программ получаем возможность реализации многомодельного подхода в расчетной практике. Первым шагом такого использования является проведение упругих расчетов

и сопоставление полученных результатов со значениями пределов текучести и ползучести. Алгоритм многомодельного метода расчета напряженно-деформированного состояния строится на основе свойств материала, результатов упругого расчета напряжений, выбора по классификатору условий нагружения адекватных в рассматриваемом случае моделей с учетом имеющихся в распоряжении пользователя базовых экспериментальных данных по свойствам материала. На последнем этапе производится наиболее трудоемкий итерационный перебор моделей на основе серии расчетов в условиях пластичности и ползучести по различным теориям.

Список литературы

1. Melnikov B.E., Semenov A.S. Strategy of multimodel analysis of elastic-plastic stress-strain state //Proc.of 6th Int. Conf. On Comp. In Civil and Build. Eng.Eds. P.J.Pahl, H.Werner. Rotterdam: Balkema. 1995. P.1073-1079
2. Semenov A.S., Melnikov B.E. Multimodel analysis of the elasto-plastic and elasto-viscoplastic deformation processes in Materials and structures. Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, 1998, P.659-664
3. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М:Наука, 1966, 751 с.
4. Новожилов В.В.Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. Л:Машиностроение 1990, 223 с.
5. Гохфельд Д.А. Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М:Машиностроение, 1984, 256 с.
6. Шевченко Ю.Н. Бабешко М.Е., Терехов Р.Г. Термовязкоупругопластические процессы сложного деформирования элементов конструкций. - Киев: Наук.думка, 1992. 327 с.
7. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М: Наука.1969, 420 с.
8. Качанов Л.М. Теория ползучести.М:Физматгиз, 1960, 455 с.
9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М: Машиностроение.1975, 400 с.
10. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник под ред. С.А.Шестерикова М: Машиностроение, 1983, 101 с.
11. Механические свойства металлов и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник. //Гохфельд Д.А. Гецов Л.Б. Кононов К.М. и др. Екатеринбург 1996 , 407 с.
12. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. М: Недра. 1996, 591 с.
13. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М: Металлургия, 1978, 256 с.