

Отзыв на автореферат диссертации С. В. Бойко  
**«Моделирование формообразования элементов конструкций в условиях стационарной ползучести»**, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Существуют три способа анализа и воспроизведения в расчётах деформационных, прочностных свойств материалов и, соответственно, на этой основе долговечности конструкций<sup>1</sup>. Первый, наиболее строгий, состоит в детальном исследовании кинетики деформирования и разрушения в широком диапазоне внешних условий и разработке модели среды, отражающей основные физические закономерности поведения материала под нагрузкой. Второй, более простой, – путь инженерных расчётов, основан на методах предельного упругопластического анализа и использует более простые модели. К нему можно также отнести и методы механики деформируемого твёрдого тела, использующие экспериментально определяемые соотношения между напряжениями, деформациями и долговечностью. Третий способ – самый простой, но и наименее точный. Он применяется в случае отсутствия необходимых данных о свойствах материала и представляет собой эмпирическую связь долговечности с внешними условиями нагружения. В основе представленной работы лежит второй способ, позволяющий применить экспериментально получаемые данные о поведении материала и соответствующие формальные математические модели для решения конкретных и достаточно сложных частных задач.

В работе использовалась связь деформаций ползучести и процесса накопления повреждений с рассеянной при этом энергией (совершённой работой). Такие связи объективно существуют, но для каждого случая (характера) нагружения и НДС они различны. Поскольку рассматривается конкретная задача стационарной ползучести, включая ступенчатые изменения напряжений, то такой подход вполне приемлем. То, что сделано обобщение на случай непостоянства затраченной при разрушении работы, свидетельствует о развитии этого подхода и приближению к реальным свойствам материалов.

Излагаемый подход избавляет от необходимости исследовать то, что в действительности происходит в структуре материала, разбираясь с вопросами, касающимися физического материаловедения, и изучать причины особенностей разрушения в зависимости НДС. Он позволяет более быстро решать конкретные задачи, формально описывая особенности поведения материала, какими бы сложными они ни были. Так использование энергетического варианта теории ползучести вполне применимо для сложного НДС, в то время как физические закономерности разрушения для таких случаев ещё мало изучены<sup>2</sup>. Повреждения, развивающиеся в различных местах структуры материала, зависят от величины напряжений, температуры и длительности

процесса разрушения<sup>3</sup>. Они становятся объектами структуры материала, изменяя её неоднородность. Поэтому введение параметра повреждённости, с которым связано изменение процесса течения материала, есть необходимый шаг для уточнения расчётов в рассматриваемой здесь области моделирования.

Ценным результатом представленной работы является введение разработанных алгоритмов в программные продукты и доведение её тем самым до практического использования. Конечно, соответственно представлениям механики деформируемого твёрдого тела, здесь используется понятие «пластичность», которая в действительности есть ползучесть при нарастающих напряжениях или деформациях<sup>4</sup>. Достаточно взглянуть на уравнение на стр. 14 автореферата

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E + K |\sigma|^{k-1} \sigma,$$

где второе слагаемое в действительности всегда является интегралом от скорости пластического течения по времени. Десятки различных «теорий пластичности» отличаются только видом этого слагаемого. Однозначной связи между напряжениями и деформациями не существует. Любой материал – это неупругая среда. Даже если нет общего течения материала (ползучести), то локальные пластические деформации, происходящие в материале по тем же самым законам, дадут дополнительную деформацию неупругости, которая также зависит от скорости нагружения и температуры. В книге Ю. Н. Работнова<sup>5</sup> (стр. 241–242) приведены иллюстрации к попыткам выделить из диаграммы растяжения сплава Д16 АТ (250°C) и титанового сплава ВТ-5-1 (600–900°C) вклад «пластичности» (мгновенная кривая деформирования), которые к однозначному результату не приводят.

Если записать дифференциальное уравнение ползучести в виде

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E + A \exp(B\sigma),$$

то при постоянной скорости полной деформации С его решением будет выражение

$$\sigma = -\frac{1}{B} \ln \left\{ \exp[-B(\sigma_0 + EC\Delta t)] + \frac{A}{C} [1 - \exp(-BEC\Delta t)] \right\}.$$

Здесь  $\sigma_0$  и  $\varepsilon_0$  – напряжения и деформации в момент времени  $\Delta t = 0$ . Оно воспроизводит переход от упругого деформирования к пластическому течению, вне зависимости от выбранной величины временного шага  $\Delta t$ . При шаге  $\Delta t \rightarrow \infty$  из этого выражения получаем постоянные напряжения течения – «предел текучести», зависящий от скорости деформирования для каждого значения температуры

$$\sigma = -\frac{1}{B} \ln \left( \frac{A}{C} \right).$$

Эти формулы как раз и отражают суть способа, на который получено упомянутое авторское свидетельство<sup>4</sup>.

Если же в процессе течения структура материала изменяется, нужно проанализировать реальную кривую деформирования по временам шагам  $\Delta t$  и определить, как изменяются параметры  $A$  и  $B$  в связи с изменениями структуры материала. Затем подобрать функцию, формально описывающую эти изменения в результате течения и разрушения. И параметр повреждённости может занять здесь соответствующее место. При структурных изменениях в сплаве можно, например, воспользоваться формальной теорией кинетики превращений<sup>6</sup>. Анализируемые в диссертации свойства дисперсионно твердеющих сплавов – именно тот случай, когда процесс пластического течения приводит к изменениям структуры материалов, и это можно было бы отразить.

Понятно, что при формировании панелей материал получает повреждения, которые сказываются на его ресурсных характеристиках. Имеется в виду долговечность при переменных нагрузках в эксплуатации. Используемый в работе параметр повреждённости не может однозначно характеризовать остаточный ресурс изготовленной панели по упомянутой ранее причине<sup>3</sup>. Повреждённость в условиях «пластичности» (0,56) и ползучести (0,24) при формообразовании панелей существенно отличаются, что требует подтверждения испытаниями образцов материала на остаточную долговечность или хотя бы оценки изменений их податливости, неупругости. Сопоставление податливости материала при растяжении и сжатии могло бы прояснить и различие в его повреждённости. Численное моделирование процесса разрушения<sup>7</sup> и наши экспериментальные данные<sup>8</sup> показывают различие в кинетике развития повреждений в зависимости от величины напряжений и температуры. Разумеется, это самостоятельная задача, выходящая за рамки представленной работы.

Результаты работы проиллюстрированы примерами расчёта конкретных конструкций, используемых в авиастроении. Расчётами, по всей видимости, можно выбрать оптимальный температурно-временной и температурно-силовой режим технологического процесса, что именно и нужно для практического использования результатов работы.

Замечания по представленной работе, изложенной в автореферате, следующие.

1. К сожалению, в автореферате не упомянуто, в чём состоит уточнение модели для описания процессов ползучести и разрушения с

использованием параметра повреждённости и к какому отличительному результату это приводит. Это же основа всей работы.

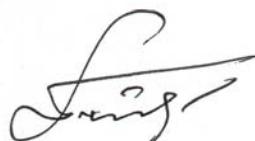
2. Ничего не сказано о различии между повреждённостью при растяжении и сжатии. А она по имеющимся экспериментальным данным различна. Процесс ползучести при сжатии продолжается, в то время как при растяжении на этот же момент времени образец разрушен (стр. 247)<sup>5</sup>.
3. Деформации ползучести имеют значительный разброс. На рис. 1 автореферата это не отражено. Не понятно, параметрическая идентификация модели выполнена по усредненным данным материала для каждого режима нагружения или взят набор данных по отдельным образцам. Не указано, как представлена температурная зависимость коэффициентов, описывающих процесс ползучести. Результаты расчётов правильнее назвать удовлетворительно согласующимися с экспериментом. Рис. 1 (а), например, показывает некоторые характерные отличия расчёта от эксперимента, которые следовало бы проанализировать и объяснить.
4. Не указано, в каком структурном состоянии были сплавы Д16 и АК4-1. Обычно применяемые на практике Д16 Т и АК4-1 Т1 принципиально различаются тем, что первый – зонно состаренный, а второй – фазово состаренный материал. Их деформационные свойства при ползучести принципиально отличаются. По нашим данным остаточная деформация у сплава АК4-1 Т1 изменяется в диапазоне до двух порядков в зависимости от температуры и напряжений<sup>9</sup>. Его исходное состояние – это максимум твёрдости и минимум пластичности, а процесс разрушения при ползучести приводит только к росту остаточной деформации. Сплав же Д16 Т в процессе ползучести проходит это состояние, и соответствующая комбинация температуры и напряжений даёт минимальную остаточную деформацию. Соответственно изменяется и затраченная при разрушении работа. То есть, при ползучести этих сплавов в условиях повышенной температуры происходят изменения соотношений между процессами деформирования и разрушения при сохранении линейной зависимости логарифма долговечности от напряжений для каждого значения температуры в определённом её интервале<sup>10</sup>.
5. В связи с этим возникает вопрос (стр. 10 автореферата), почему при испытании образцов материала АК4-1 ( $200^{\circ}\text{C}$ ) деформация в конечный момент времени  $\varepsilon_* = 1/\sigma$ ? Видимо, имелось в виду, что  $\varepsilon_* = A_*/\sigma$  при  $A_* = 1$ . Опять же по нашим данным, с ростом напряжений остаточная деформация только растёт, если сплав был в состоянии Т1. Если же нет, то может происходить, как у Д16 Т, переход к фазово состаренному состоянию с уменьшением остаточной деформации. Ведь температура

195°C – это режим фазового старения после закалки сплава АК4-1<sup>11</sup>. А действующие напряжения при этом ускоряют процесс<sup>9</sup>.

Несмотря на высказанные замечания, следует отметить, что большой объём проведённых экспериментальных и расчётных работ, вклад автора в разработку и проведение анализа получаемой информации, отличающейся большим разнообразием, являются ценным научным и практическим результатом данной работы.

Итак, представленная работа представляет собой продуманный и последовательно проведённый цикл исследований, решающим в комплексе методическую, научную и научно-практическую части поставленных задач, имеющих существенное значение для производства элементов конструкций с целью повышения их технологичности. Достаточное количество публикаций (включая персональные) входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, а также цитируемых в международных базах данных. Диссертационная работа по своему содержанию, научной направленности, объёму выполненной работы, достоверности результатов и актуальности решённых задач соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и п. 9 Положения о присуждении учёных степеней. Бойко Светлана Владимировна заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Петров Марк Григорьевич,  
ведущий научный сотрудник  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации  
имени С. А. Чаплыгина» (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»)  
кандидат технических наук  
специальность 05.07.03 – Прочность летательных аппаратов  
630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21  
Тел. (383) 278-71-31, e-mail: [mark-st@ngs.ru](mailto:mark-st@ngs.ru)



М. Г. Петров

Подпись М. Г. Петрова заверяю

Научный руководитель ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»  
доктор технических наук, профессор



А. П. Серёзнов

- 
- <sup>1</sup> Гохфельд Д. А., Чернявский О. Ф. Несущая способность конструкций при повторных нагрузлениях. – М.: Машиностроение, 1979.
- <sup>2</sup> Петров В. А., Башкарев А. Я., Веттегрен В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. – СПб.: Политехника, 1993.
- <sup>3</sup> Баландин Ю. Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. – Л.: Судостроение, 1967.
- <sup>4</sup> Поляк Л. З. Способ определения характеристик ползучести металлов. – А. с. № 390409 СССР, приоритет от 26.04.1965.
- <sup>5</sup> Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966.
- <sup>6</sup> Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. I: Термодинамика и общая кинетическая теория / Пер. с англ. под ред. А.А. Ройтбурда. – М.: Мир, 1978.
- <sup>7</sup> Овчинский А. С., Гусев Ю. С. Моделирование на ЭВМ процессов накопления повреждений в твёрдых телах под нагрузкой // ФТТ. – 1981. – Т. 23, вып. 11. – С. 3308-3314.
- <sup>8</sup> Петров М. Г., Равикович А. И. Накопление повреждений при пластическом деформировании и ползучести алюминиевых сплавов // ПМТФ. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 172-182.
- <sup>9</sup> Петров М. Г. Распад металлических пересыщенных твёрдых растворов при разрушении дисперсионно твердеющих алюминиевых сплавов // Труды VI Международной научной школы – конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение». – Барнаул: АлтГТУ, 2009. – С. 203-209.
- <sup>10</sup> Петров М. Г., Равикович А. И. О деформировании и разрушении алюминиевых сплавов с позиций кинетической концепции прочности // ПМТФ. – 2004. – Т. 45, № 1. – С. 151-161.
- <sup>11</sup> Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Справочное руководство / Под ред. Ф.И. Классова и И.Н. Фридляндра. – М.: Металлургия, 1972.