

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОГО ТЕЛА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КРИВЫМ ПОЛЗУЧЕСТИ

И.В. Изотов

izoiva@gmail.com

SPIN-код: 1642-0202

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

На основе экспериментов по ползучести, проведенных ранее, определены коэффициенты для уравнений двух различных моделей ползучести, а также установлена возможность аппроксимации этих уравнений для более сложных условий нагружения. Полученные результаты показывают, что широко распространенный для аппроксимации ползучести закон Нортона дает плохие результаты в случаях изменения нагрузки на образец. В то же время закон, основанный на гиперболических функциях, позволяет значительно повысить точность оценки развития процесса ползучести. Применение полученных формул и коэффициентов должно привести к более надежному прогнозированию ресурса конструкций, работающих в условиях высоких температур и нагрузок.

### Ключевые слова

Ползучесть, деформация, ресурс, модели ползучести, испытания на ползучесть, механизмы повреждаемости, аппроксимация уравнений ползучести, конечно-элементный расчет ползучести

Поступила в редакцию 29.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

Для конструкционных материалов, прежде всего металлов, правильное определение деформаций ползучести имеет очень важное значение. Без таких данных невозможно правильно определить предельную деформацию и расчетный ресурс конструкций. Для получения достоверных результатов важно сочетать простоту описания ползучести с характерными особенностями этого процесса. Целью данной работы является решение этих задач с помощью экспериментальных исследований.

Сложность физических процессов ползучести и повреждаемости элементов конструкции приводит к необходимости применять феноменологический подход к составлению определяющих уравнений ползучести. Однако используемые в последнее время математические модели ползучести, а также известные из литературы результаты расчетов на длительную прочность обычно ограничены изотермическими условиями [1–12]. Расширение имеющихся моделей до вариантов, учитывающих изменение условий, требует дорогостоящих экспериментов на ползучесть и, как следствие, знания большого числа констант ползучести. Поэтому для практики машиностроения важно создание теорий, которые были бы, с одной стороны, простыми, а с другой — описывали бы явление ползучести в сложных условиях. Применение таких теорий крайне актуально в различных

программных комплексах, особенно для расчета сложных конструкций в энергетическом машиностроении и двигателестроении, которые сложно испытать на ползучесть на натуральных образцах.

Для точного описания температурных зависимостей ползучести в широком диапазоне температур необходимо обратить внимание на следующие вопросы.

Во-первых, константы материала в уравнении для скорости ползучести зависят от температуры. Для того чтобы подобрать подходящие функции, зависящие от температуры, необходимо иметь экспериментальные данные для широкого диапазона температур.

Во-вторых, если допустить, что напряжение образца остается постоянным в течение эксперимента на ползучесть, изменение значений температуры может привести к изменению деформации или механизма повреждаемости.

**Описание эксперимента.** Эксперимент по исследованию ползучести стали 20 был проведен в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1].

Условия и порядок экспериментального изучения ползучести при высоких температурах определяет ГОСТ 3248–60. Однако эти нормативы установлены лишь до температуры 1473 К. Кроме того, они не учитывают особенностей ползучести при температурах предплавления, между солидусом и ликвидусом, даже если эти температуры меньше 1473 К. Фактически единой методики испытаний металлов при высоких температурах, в частности, испытаний на ползучесть, в настоящее время нет. Различаются как оборудование, так и форма образцов, способы и режимы нагрева и выдержки образцов, способы защиты образцов от окисления и т. п. Поэтому при разработке методики проведения экспериментов руководствовались не только конечной целью исследований, но и накопленным в этой области практическим опытом.

Испытания на ползучесть проводили на образцах, вырезанных из непрерывнолитой заготовки сечением 70×200 мм стали 20 следующего химического состава: С — 0,18 %, Mn — 0,50 %, Si — 0,22 %, S — 0,02 %, P — 0,015 %, Ni — 0,07 %, Cr — 0,06 %, остальное — Fe. Были выбраны цилиндрические образцы диаметром 10 мм и расчетной длиной 100 мм, выточенные из заготовок квадратного поперечного сечения 20×20 мм, вырезанных из наружных и внутренних слоев непрерывного слитка. Ряд пробных опытов не выявил различия между ползучестью образцов, вырезанных как в продольном, так и в поперечном направлениях по отношению к оси непрерывного слитка. Поэтому экспериментальные исследования ползучести непрерывнолитой стали 20 проведены только на продольных образцах. Слиток был получен на радиальной опытно-промышленной МНЛЗ ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова.

Испытания на ползучесть проведены в лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В интервале температур 1123...1293 К использовалась испытательная машина АИМА-5-1, при более высокой температуре — машина МП-1200М, переоборудованная для испытаний при температуре до 1600 К. Измерение температуры осуществлялось хромель-алюмелевыми (до 1293 К) и платино-платинородиевыми (свыше 1293 К) термопарами, пред-

варительно протарированными и прикрепленными на концах рабочей части образца и экранированными от непосредственного излучения нагревательной спирали. Во всех опытах показания термодатчиков периодически контролировались потенциометром ПП-63, а на машине МП-1200М температура испытаний к тому же непрерывно контролировалась с помощью электронного потенциометра ЭПП-09М, снабженного терморегулятором. Отклонения от температуры испытания по длине рабочей части образца не превышали  $\pm 4$  К при температуре до 1173 К и  $\pm 6$  К в интервале температур 1253...1573 К. Скорость нагрева составляла 15...20 К/мин, выдержка на заданном режиме — 40...60 мин.

Нагружение осуществлялось после установления температурного режима статически через рычажную систему машины АИМА-5-1 и непосредственным приложением тарированных грузов с использованием нагружающего механизма машины МП-1200М. Точность приложенной нагрузки проверяли образцовыми динамометрами системы Токаря, причем погрешность не превышала 1 %. Удлинения образца в результате ползучести на машине АИМА-5-1 записывали с помощью экстензометра, снабженного двумя индикаторами часового типа МИЛ с ценой деления 0,01 мм. При больших перемещениях удлинение образца определялось с использованием мерной линейки с ценой деления 1 мм (погрешность  $\pm 0,5$  мм).

При высоких температурах интенсивно происходит процесс окисления поверхности образца. Образование оксидной пленки может существенно исказить результаты испытаний. Поэтому при разработке методики испытаний большое внимание было уделено вопросу защиты образцов от окисления.

В литературе [7] описаны способы защиты поверхности образцов от окисления. Анализ показывает, что практически каждому из них присущи определенные недостатки. Так, испытания в вакууме сопровождаются диффузионными процессами и изменением химического состава образца, что ограничивает температуру нагрева для стали значением 1473 К. Водородная среда способствует обезуглероживанию стали уже при температуре около 873 К, гелий обладает большой собственной теплопроводностью, что создает трудности при нагреве. Наиболее предпочтительной является атмосфера аргона, отрицательное влияние которого на образцы не обнаружено.

Заслуживает внимания также способ суспензионного покрытия образца слоем липкого стекла, который, оплавляясь в процессе нагрева, образует защитную пленку. Этот способ защиты от окисления был проверен в пробных экспериментах при температурах 1123 и 1293 К. После нагрева образца до температуры 1123 К, выдержки в течение одного часа, двадцатиминутного деформирования и последующего охлаждения в печи защитный слой не нарушился и окисления на поверхности образца не появилась. Однако испытания при температуре 1293 К даже без деформирования показали, что защита стеклянной эмульсией не столь эффективна: диаметр рабочей части образца уменьшился на 4 %. Поэтому при температуре более 1293 К испытания проводили в среде чистого аргона, который непрерывно подавался в рабочее пространство нагревательной

печи посредством специального устройства. Предварительные опыты при температуре 1173 и 1373 К показали, что после нагревания образца, выдержки в течение трех часов и охлаждения площадь его поперечного сечения практически не менялась. При более высокой температуре небольшой слой окалина появлялся лишь в процессе охлаждения образца, т. е. после прекращения подачи аргона.

Для опытов на растяжение использованы образцы, вырезанные из краевой зоны непрерывного слитка. Образцы растягивали с постоянными значениями 4,2 и 42 мм/мин скорости перемещения активного захвата (соответственно  $\xi = 7 \cdot 10^{-4}$  и  $7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ). Использовали испытательную машину Р-5, которая была снабжена секционной печью от машины для испытаний на ползучесть МП-1200М. График зависимости «нагрузка — удлинение образца» записывали с помощью диаграммного аппарата машины.

Непосредственными результатами экспериментов являлись измерения накопленной деформации ползучести  $\epsilon^c$  в фиксированные моменты времени  $t$  при неизменных в опыте значениях температуры  $T$  и растягивающего напряжения  $\sigma$ . Анализ результатов испытаний на ползучесть показывает, что в интервале температур 1200...1600 К характерно наличие ярко выраженной первой (неустановившейся) стадии ползучести, когда скорость деформации ползучести  $\xi^c = d\epsilon^c/dt$  убывает. Отметим, что при деформировании слитка в процессе непрерывной разливки деформации, возникающие в результате его изгиба и охлаждения, не превышают нескольких процентов. Поэтому, принимая во внимание и время затвердевания непрерывного слитка (15...30 мин), целесообразно приводить только начальные участки кривых ползучести, включающие первые две стадии — неустановившуюся и установившуюся.

Проанализируем результаты опытов на ползучесть с точки зрения возможной формулировки уравнения состояния, позволяющего с определенной степенью точности описать ползучесть при переменных значениях температуры и напряжения. Для этого важно систематизировать результаты, относящиеся к моменту разрушения образцов, чтобы иметь возможность связать условия нагружения, нагрева и деформирования с временем работы материала до разрушения.

Описание неупругого деформирования материала непрерывнолитой заготовки должно отражать ряд существенных эффектов, которые соответствуют поведению реальных материалов. Для поликристаллических материалов наиболее существенными из них являются одновременно протекающие при высоких температурах процессы деформационного упрочнения и термического разупрочнения.

Деформационное упрочнение проявляется в двух формах. Изотропное упрочнение приводит к повышению сопротивления материала неупругому деформированию во всех направлениях и связано с увеличением плотности дефектов в кристаллических зернах, которые препятствуют движению дислокаций и относительному скольжению атомных слоев кристаллической решетки.

Анизотропное упрочнение вызывает повышенное сопротивление деформированию в направлении предварительно приложенной нагрузки и пониженное — в противоположном направлении. Оно связано с образованием ориентированных внутренних микронапряжений в скоплениях дислокаций, расположенных перед препятствиями их движению в плоскостях скольжения кристаллического материала. Как отмечено в работе [1], экспериментальные исследования ползучести при сложном нагружении указывают на существенно анизотропный характер упрочнения в условиях ползучести.

С повышением температуры в материале интенсифицируются процессы термического разупрочнения. Эти процессы связаны, с одной стороны, с преодолением дислокациями препятствий и выходом их из скоплений, что понижает уровень ориентированных микронапряжений и снижает анизотропное упрочнение материала, а с другой стороны, с упорядочением микроструктуры кристаллических зерен и уменьшением плотности дефектов в кристаллической решетке, что снижает сопротивление движению дислокаций в плоскостях скольжения и тем самым компенсирует изотропное упрочнение.

Активизация с повышением температуры механизмов перемещения дислокаций в обход препятствий их движению в плоскостях скольжения приводит к интенсификации ползучести материала. Скорость деформации ползучести помимо температуры зависит также от текущего уровня изотропного и анизотропного упрочнения материала и, в свою очередь, влияет на повышение их уровня, т. е. неупругое поведение материала из-за непрерывного накопления эффектов упрочнения является следствием всей предыстории его деформирования.

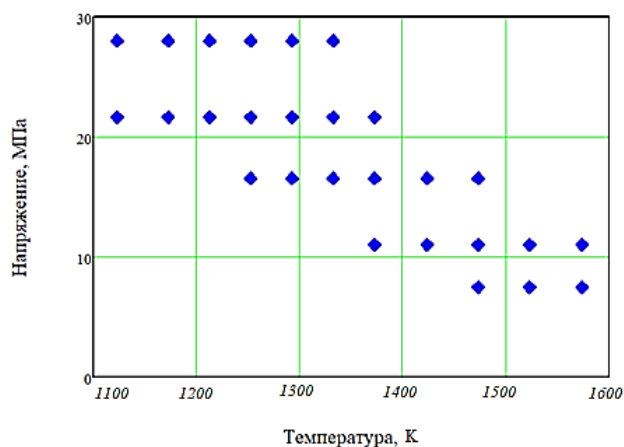


Рис. 1. Программа эксперимента на ползучесть при растяжении низкоуглеродистой стали

На рис 1 представлена программа эксперимента на ползучесть при растяжении, сами экспериментальные данные показаны отдельными точками [1]. Эксперимент проводили при постоянных напряжениях для диапазонов напряжений 7,5...28,0 МПа и температур 1123...1573 К.

В настоящей работе рассмотрены два варианта аппроксимации минимальной скорости деформации на стадии установившейся ползучести, включающие традиционную экспоненциальную зависимость от температуры [2, 5] и аппроксимации по напряжениям в виде степенной функции и гиперболического синуса.

Приведем выражения для часто используемого степенного закона ползучести в виде [12]:

$$\Phi_1 = A_c \exp\left(-\frac{D}{T}\right) \sigma^n. \quad (1)$$

Выражение (1) иногда называют законом Нортона [11, 12].

Вторая популярная аппроксимация в виде гиперболического синуса используется в виде [1]

$$\Phi_2 = A_c \exp\left(-\frac{D}{T}\right) \operatorname{sh} \frac{\sigma}{B(T)}, \quad (2)$$

где  $B(T) = \left(\frac{T_0}{T}\right)^m$ .

В уравнениях (1) и (2)  $D$  и  $A_c$  — коэффициенты, поиск которых будет выполнен далее.

Отметим, что выражение (2) присутствует в библиотеке конечно-элементного вычислительного комплекса Ansys [11].

Логично было бы сформировать целевые функции для относительных отклонений. Для нахождения констант в выражениях (1) и (2) используется метод наименьших квадратов. Минимизируемые функции для традиционного метода наименьших квадратов [12] можно записать в следующем виде:

$$R(A_c, D, n) = \sum_{j=1}^{N_{\text{эксп}}} \left[ \Phi_1(A_c, D, n, T_j, \sigma_j) - \xi_{\text{эксп } j}^c \right]^2 \quad (3)$$

или

$$R(A_c, D, m, T_0) = \sum_{j=1}^{N_{\text{эксп}}} \left[ \Phi_2(A_c, D, m, T_0, T_j, \sigma_j) - \xi_{\text{эксп } j}^c \right]^2, \quad (4)$$

где суммирование ведется по всем  $j$ -м экспериментальным точкам.

Предварительная обработка экспериментальных данных показала, что при использовании выражений в данном виде они имеют достаточно слабую чувствительность при низких температурах и напряжениях. По предложению С.В. Зарубина выражение нормализовано, чтобы улучшить результаты, разделив его на  $\xi_{\text{эксп } j}^c$  на каждом шаге.

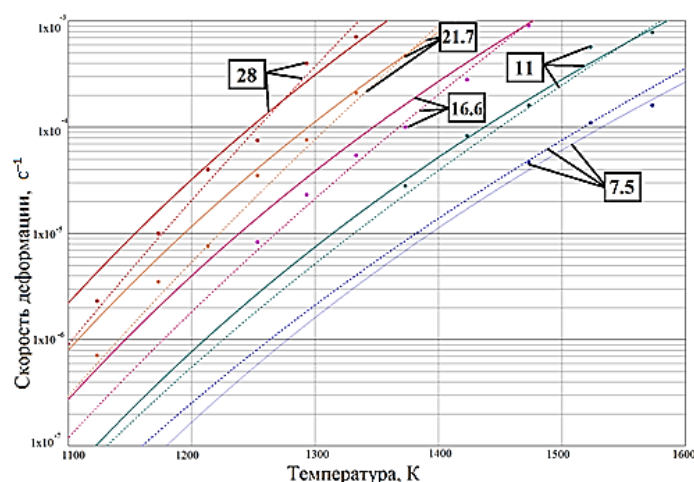
$$R(A_c, D, n) = \sum_{j=1}^{N_{\text{эксп}}} \left[ \frac{\Phi_1(A_c, D, n, T_j, \sigma_j) - \xi_{\text{эксп } j}^c}{\xi_{\text{эксп } j}^c} \right]^2, \quad (5)$$

или

$$R(A_c, D, m, T_0) = \sum_{j=1}^{N_{\text{эксп}}} \left[ \frac{\Phi_2(A_c, D, m, T_0, T_j, \sigma_j) - \xi_{\text{эксп}j}^c}{\xi_{\text{эксп}j}^c} \right]^2. \quad (6)$$

При минимизации данных функций получены константы для аппроксимации данных функций (5), (6)  $\Phi_1 = 0$  и  $\Phi_2 = 0$ .

Полученные результаты представим в графическом виде (рис. 2). Построим графики всех вариантов нагружения в одних координатах. Видно, что функция с применением гиперболического синуса гораздо точнее соответствует экспериментальным данным.



**Рис. 2.** Экспериментальные и расчетные зависимости скоростей деформации установившейся ползучести от температуры при различных значениях растягивающего напряжения

На рис. 2 сплошными линиями обозначена расчетная зависимость (1), прерывистыми — зависимость, полученная согласно формуле (2), точками обозначены экспериментальные данные. Отметим, что при повышении температуры и напряжений графики зависимости (2) лежат несколько ближе к экспериментальным данным.

Интересно оценить достоверность полученных аппроксимаций при другом виде нагружения. Для стали 20, использованной в эксперименте, имеется информация о кривых растяжения с постоянной скоростью деформации.

Составим расчетную модель для получения кривых растяжения.

Положим, что общая деформации складывается из упругой деформации и деформации ползучести:  $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^c$ .

Аналитически данные выражения проинтегрировать невозможно, поэтому используем метод шагов по времени.

Приращение времени  $\Delta t$  за шаг вычисления примем постоянным:

$$T = \text{const}; \quad t_i = t_{i-1} + \Delta t; \quad \xi = \xi_0.$$

Найдем приращение деформации за  $i$ -й шаг:

$$\xi_0 \Delta t = \Delta \varepsilon_i = \frac{1}{E} \Delta \sigma_i + \Delta t \xi_i^c. \quad (7)$$

Скорость деформации ползучести в конце шага по времени представим как

$$\xi_i^c = \xi_{i-1}^c + d\xi^c \quad (8)$$

Обозначим скорость деформации

$$\xi^c = \Phi. \quad (9)$$

Тогда в первом приближении получим

$$d\xi^c = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right) d\sigma. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) в (7), получим для скорости ползучести в конце шага:

$$\xi_i^c = \xi_{i-1}^c + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right)_{i-1} \Delta \sigma_i; \quad (11)$$

$$\xi_0 \Delta t = \frac{\Delta \sigma_i}{E_*} + \varepsilon_i^*. \quad (12)$$

Тогда (7) можно переписать как

$$E_* = \left[ \frac{1}{E} + \Delta t \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right)_{i-1} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Используем модифицированный модуль упругости:

$$\Delta \varepsilon_i^* = \Delta t \xi_{i-1}^c;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = n A_{c1} \exp\left(-\frac{D_1}{T}\right) \sigma^{n-1}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \frac{A_{c2}}{B(T)} \exp\left(-\frac{D_2}{T}\right) \operatorname{ch} \frac{\sigma}{B(T)}. \quad (15)$$

В результате для получения кривой растяжения с постоянной скоростью деформации приращение напряжений на временном шаге выглядит следующим образом:

$$\Delta \sigma_i = E_* (\xi_0 \Delta t - \Delta \varepsilon_i^*); \quad (16)$$

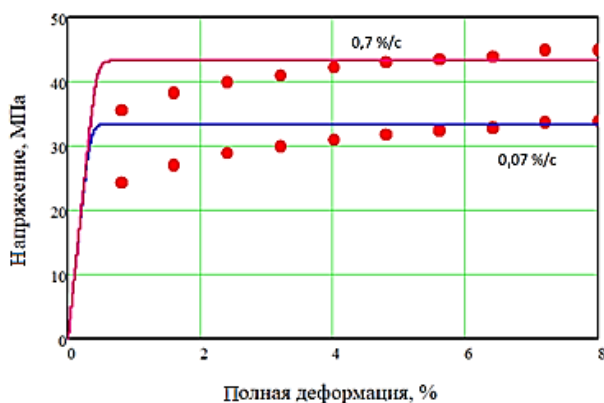
$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma_i; \quad (17)$$



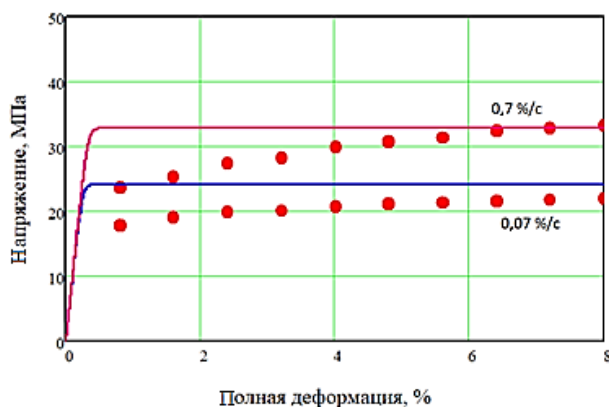
Начальные условия

$$t = 0; i = 0; t_0 = 0; \sigma_0 = 0.$$

На рис. 3 и 4 показаны кривые растяжения для различных скоростей деформирования и температур, полученные с использованием выражений аппроксимаций (14) и (15).



а

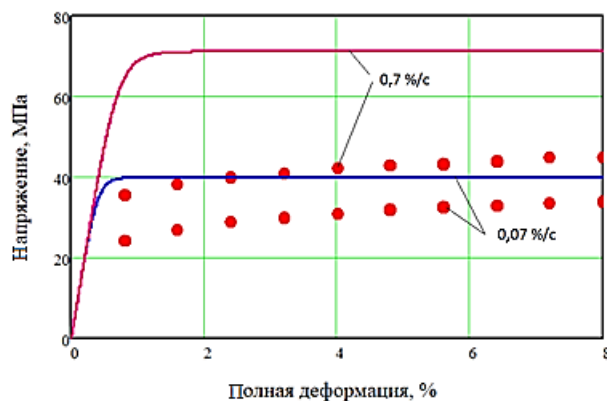


б

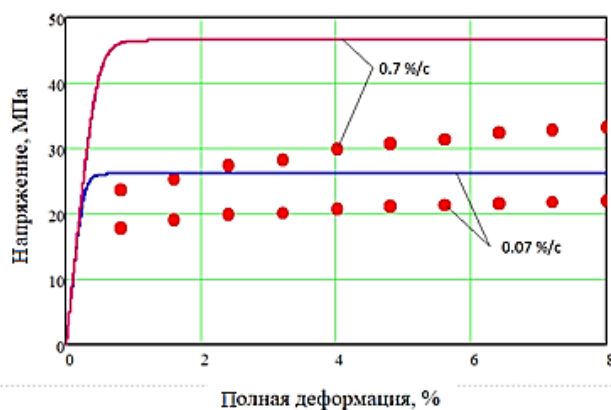
Рис. 3. Экспериментальные данные и расчетные кривые растяжения при различной температуре:

а — 1253 К; б — 1333 К

**Заключение.** Представленные в статье прикладные варианты аппроксимации функционалов пластичной теории ползучести распространены на процессы, развивающиеся в реальном времени. Использование законов, основанных на гиперболических функциях, позволяет достаточно точно прогнозировать развитие процессов ползучести, ошибка не превышает 2...3 % для достаточно заметных деформаций. В случае же использования классического закона



а



б

Рис. 4. Экспериментальные данные и расчетные кривые растяжения при различной температуре:

а — 1253 К; б — 1333 К

Нортон прогнозирование не может дать никаких реальных предсказаний, не наблюдается вообще никакой корреляции полученной экстраполяции с экспериментальными данными, погрешность превышает 100 %. В дальнейшем предполагается проанализировать другие материалы, а также уточнить возможность использования подобных методик для описания процессов неустановившейся ползучести.

### Литература

- [1] Данилов В.Л., Зарубин С.В. Анализ деформации и разрушения слитка. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1985, № 1, с. 25–28.
- [2] Малинин Н.Н., ред. Исследование ползучести металлов при растяжении. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.

- [3] Бондарь В.С., Даншин В.В., Костин А.И. Аппроксимации функционалов пластичности теории упругопластических процессов при неизотермическом нагружении в условиях ползучести. *Известия МГТУ МАМИ*, 2012, т. 2, № 2, с. 341–345.
- [4] Агахи К.А., Кузнецов В.Н., Локощенко А.М. и др. Моделирование процесса ползучести на основе аппроксимации экспериментальных данных. *Машиностроение и инженерное образование*, 2011, № 2, с. 52–57.
- [5] Шестериков С.А. Избранные труды. М., Изд-во Московского университета, 2007.
- [6] Мяченков В.И., ред. Расчеты на прочность. Вып. 33. М., Изд-во Машиностроение, 1993.
- [7] Данилов В.Л., Зарубин С.В. Численное моделирование движения фронта разрушения в затвердевающем теле. *Известия РАН. МТТ*, 1994, № 1, с. 80–85.
- [8] Brown G.R., Evans R.W., Wilshire B. Exponential descriptions of normal creep curves. *Scripta Metall.*, 1986, vol. 20, no. 6, pp. 855–860. DOI: 10.1016/0036-9748(86)90454-0 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0036974886904540>
- [9] Collins J.A. *Damage mechanics of materials and structures*. Wiley, 1981.
- [10] Падалкин Б.В. Математическое моделирование процессов аварийного деформирования элементов конструкций АЭС в условиях кратковременной ползучести. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.
- [11] Boyle J.T., Spence J. *Stress analysis for creep*. Butterworth, 1983.
- [12] Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1958.

**Изотов Иван Владимирович** — инженер-конструктор ПАО «Корпорация ИР-КУТ», магистрант кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF NON-VISCOUS  
BODY DEFORMATION MODELS BY EXPERIMENTAL CREEP CURVES**

I.V. Izotov

izoiva@gmail.com

SPIN-code: 1642-0202

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

*This article presents the determination of the coefficients for the equations of two different creep models on the basis of creep experiments conducted earlier. The possibility of approximation of these equations for more complex loading conditions was established. The results obtained show that the Norton law, which is widespread for the approximation of creep, gives poor results in cases of load changes on the sample. At the same time, a law based on hyperbolic functions can significantly improve the accuracy of the estimation of the creep process development. The application of the obtained formulas and coefficients should lead to a more reliable prediction of the life of structures operating under conditions of high temperatures and loads.*

**Keywords**

*Creep, deformation, operational life, creep models, creep tests, damage mechanisms, approximation of creep equations, finite element creep calculation*

Received 29.04.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

**References**

- [1] Danilov V.L., Zarubin S.V. Deformation and destruction analysis of ingot. *Izvestiya Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1985, no. 1, pp. 25–28 (in Russ.).
- [2] Malinin N.N., ed. *Issledovanie polzuchesti metallov pri rastyazhenii* [Study on metal creep under tension]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1997 (in Russ.).
- [3] Bondar' V.S., Danshin V.V., Kostin A.I. Approximation of plasticity functionals of elastic-plastic processes theory in non-isothermal loading under creep conditions. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 341–345 (in Russ.).
- [4] Agakhi K.A., Kuznetsov V.N., Lokoshchenko A.M., et al. Simulation of creep process on the basis of observed data approximation. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2011, no. 2, pp. 52–57 (in Russ.).
- [5] Shesterikov S.A. *Izbrannye Trudy* [Selected works]. Moscow, MSU Publ., 2007 (in Russ.).
- [6] Myachenkov V.I., ed. *Raschety na prochnost'. Vyp. 33* [Strength calculations. Iss. 33]. Moscow, Izd-vo Mashinostroenie, 1993 (in Russ.).
- [7] Danilov V.L., Zarubin S.V. Numerical simulation of destruction front movement in solidifying body. *Izvestiya RAN. MTT*, 1994, no. 1, pp. 80–85 (in Russ.).
- [8] Brown G.R., Evans R.W., Wilshire B. Exponential descriptions of normal creep curves. *Scripta Metall.*, 1986, vol. 20, no. 6, pp. 855–860. DOI: 10.1016/0036-9748(86)90454-0 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0036974886904540>
- [9] Collins J.A. *Damage mechanics of materials and structures*. Wiley, 1981.
- [10] Padalkin B.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov avariynogo deformirovaniya elementov konstruktsiy AES v usloviyakh kratkovremennoy polzuchesti*. Avtoref.

diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modelling of emergency deformation of construction elements. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996 (in Russ.).

[11] Boyle J.T., Spence J. Stress analysis for creep. Butterworth, 1983.

[12] Linnik Yu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [Least squares method and fundamentals of mathematic-statistic theory of observation analysis]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1958 (in Russ.).

**Izotov I.V.** — Design Engineer of PAO IRKUT Corporation, M.Sc. Student, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.