

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-22-28

В.С. Ерасов¹

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В 3D-ПРОСТРАНСТВЕ

Рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение: деформации, напряжения и времени. Представлены основные зависимости, характеризующие это взаимодействие при испытаниях на статическое растяжение, ползучесть и усталость. Представлены возможности современных испытательных машин. Показана тенденция развития экспериментальных методов, направленная на развитие испытаний при жестком режиме нагружения (управление скоростью деформирования образца с помощью экстензометра, закрепленного на рабочей базе образца). Показаны преимущества представления процессов испытаний и их результатов в 3D-системе осей: напряжение, деформация и время.

Ключевые слова: механические испытания, мягкое нагружение, жесткое нагружение, растяжение, скорость деформирования, упругая деформация, пластическая деформация, ползучесть, усталость, 3D-система осей: напряжение, деформация, время.

The paper presents interaction of time, strain and stress at tensile tests. The main laws of this interaction were shown for static, creep and fatigue tensile tests. Capabilities of modern testing machines are shown as well. A trend in the development of experimental methods for rigid loading (strain rate control with extensometer fixed on the gauge length of a specimen) is described. Advantages of the 3D-presentation of testing procedure, data processing and logging are shown.

Keywords: mechanical tests, soft loading, rigid loading, tension, strain rate, elastic deformation, plastic deformation, creep, fatigue, 3D-presentation axes: stress-strain-time.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Для оптимального проектирования машин и конструкций необходимо знание условий, при которых в материале будут достигнуты предельные состояния при статических и циклических режимах эксплуатационного нагружения. Требуется проведение большого количества механических испытаний образцов, элементов конструкций, самих машин и конструкций, чтобы определить эти условия и выбрать необходимые запасы по расчетам на прочность, обеспечивающие полный цикл эксплуатации [1–8]. В качестве основных критериев для определения условий достижения предельных состояний используются силовые, деформационные и энергетические критерии. В работе [9] отмечено, что деформационные критерии достижения предельных состояний предпочтительнее для взаимосвязанного анализа прочности и ресурса.

В данной работе рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение: деформации, напряжения и времени. Представлены основные зависимости, характеризующие это взаимодействие при испытаниях на статическое растяжение, ползучесть и усталость. Показаны тенденция развития испытаний – испытания при жестком режиме нагружения, а также

преимущества представления процессов испытаний и их результатов в 3D-системе осей: напряжение, деформация и время. Наличие оси времени показывает, что за счет протекания во времени пластической деформации ни силовой, ни энергетический, ни деформационный критерии не исключают повреждаемости и разрушения образца материала, а соответственно – и конструкции из него. Деформационный критерий (теоретически) безопаснее силового и энергетического критериев при учете снижения несущей способности конструкции.

Материалы и методы

В настоящее время наиболее распространенным и информативным способом определения механических свойств материалов являются испытания на статическое растяжение, с помощью которых определяют основные механические свойства материала [1–5]. Результатом испытания на статическое растяжение является диаграмма деформирования, которая дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и пластической областях. Исторически сложилось так, что первые механические испытания проводили при мягком нагружении, при котором к образцу прикладыва-

ли силу и регистрировали только одну величину – разрушающую нагрузку. Затем стали регистрировать зависимость напряжения от деформации, т. е. пришли к жесткому нагружению, когда задается деформация образца, а регистрируется соответствующее данной деформации напряжение:

$$\sigma = F(\varepsilon). \quad (1)$$

Основным преимуществом жесткого нагружения перед мягким является возможность получения диаграмм деформирования при большой скорости протекания пластической деформации в образце, когда напряжение остается постоянным (площадка текучести) или даже падает («зуб» текучести), что невозможно при мягком нагружении.

Методику испытания на растяжение в настоящее время определяют международные стандарты EN ISO 6892-1(2009) Metallic Materials – Tensile Testing, ASTM E8-08 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. На рис. 1 представлены рекомендуемые скорости испытания по стандарту EN ISO 6892-1(2009). Скорости испытания могут быть выбраны по методам *A* или *B*. Метод *A* требует проводить контроль скорости испытания по экстензометру, закрепленному на рабочей части образца, а в методе *B* допускается контроль по скорости изменения напряжения на упругом участке и по скорости перемещения активной траверсы после появления пластической деформации. Предпочтение следует отдать методу *A* как более современному, обеспечивающему более равные условия испытания по сравнению с методом *B*.

Современные испытательные машины позволяют проводить испытания и исследования механических свойств материалов в широком диапазоне скоростей и величин деформации и температуры, в том числе при программном нагружении.

Цифровая система регистрации обеспечивает запись параметров испытаний в координатах:

- «нагрузка–время»;
- «деформация образца в одном, двух или трех направлениях–время»;
- «перемещение нагружающего поршня или траверсы–время»;
- «температура–время» по каждой термопаре.

Персональный компьютер для управления и обработки результатов испытаний обеспечен программами, позволяющими синхронизировать параметры и получать диаграммы в координатах «нагрузка–деформация», «нагрузка–перемещение нагружающего поршня или траверсы», «деформация рабочей базы образца в одном направлении–деформация рабочей базы образца в одном или двух перпендикулярных направлениях», их обработку в координатах «напряжение–относительная деформация».

С введением цифрового компьютерного управления логичен переход к 3D-регистрации результатов испытаний [10], так как испытание проводится в трехмерной системе координат σ – ε – t

(рис. 2, *a*). Рассмотрим только 1/8 часть этого пространства, где проходят испытание на растяжение и регистрация результатов. Диаграмма в плоскости σ – 0 – ε существует только как проекция диаграммы из 3D-системы в 2D-систему (см. рис. 2, *b*). Две другие плоскости σ – 0 – t и ε – 0 – t (см. рис. 2, *в*, *г*) – соответственно плоскости мягкого нагружения и жесткого нагружения, где происходит управление нагружением при испытании.

В случае управления испытанием в жестком режиме – испытание регистрируют в плоскости σ – 0 – ξ (см. рис. 2, *б*), где ось ξ – линия пересечения этой плоскости с плоскостью ε – 0 – t .

Величину ξ можно выразить через значения ε , $\dot{\varepsilon}$ и t :

$$\xi = \sqrt{\varepsilon^2 + (bt)^2} = t\sqrt{\dot{\varepsilon}^2 + b^2}, \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформирования образца на рабочей длине; $b=1 \text{ с}^{-1}$ – коэффициент, служащий для получения одинаковой размерности складываемых величин.

Следует иметь в виду, что $\dot{\varepsilon} = \text{tg}\varphi$, где φ – угол между плоскостями σ – 0 – ξ и σ – 0 – t . Чем меньше угол φ (или $\dot{\varepsilon}$), тем больше напряжение σ зависит только от фактора времени, тем ближе плоскость σ – 0 – ξ к плоскости σ – 0 – t , тем ближе жесткое нагружение к мягкому. И наоборот, чем меньше величина K (коэффициент упругости) при мягком нагружении по закону $\sigma = Kt$ (см. рис. 2, *в*), тем ближе мягкое нагружение к жесткому, т. е. при нагружениях, оси которых (ξ на рис. 2, *б*) близки к оси времени t , мягкое и жесткое нагружения могут быть взаимозаменяемыми, так же как и нагружение с высокими скоростями деформирования и нагружения.

На рис. 3 представлена зависимость величины ξ от скорости испытания $\dot{\varepsilon}$. При малых скоростях испытания ($\dot{\varepsilon} \rightarrow 0$) – $\varepsilon \rightarrow bt$, что позволяет сделать следующий вывод: при малых скоростях испытания время играет главенствующую роль, т. е. $\sigma(\varepsilon) \rightarrow \sigma(t)$, плоскость σ – 0 – ξ находится рядом с плоскостью σ – 0 – t , $\varphi \rightarrow 0$ (см. рис. 2, *б*).

Статические испытания можно рассматривать как серию равновесных состояний, возникающих со скоростями порядка – от 10^{-11} до 10^{-3} с^{-1} . При проведении многих стандартных механических испытаний фактор скорости (или времени) часто вообще не учитывается и не регламентируется [11]. Получается парадокс: время – важный фактор, но оно не учитывается.

При механических испытаниях встречаются диаграммы деформирования с выраженным длительным горизонтальным участком (рис. 4). На этом участке:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = 0, \quad (3)$$

где $d\varepsilon/dt = \dot{\varepsilon} = \text{const}$ – скорость испытания, т. е. $\sigma = \text{const}$, а $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ при $\sigma = \text{const}$ означает установившуюся стадию ползучести.

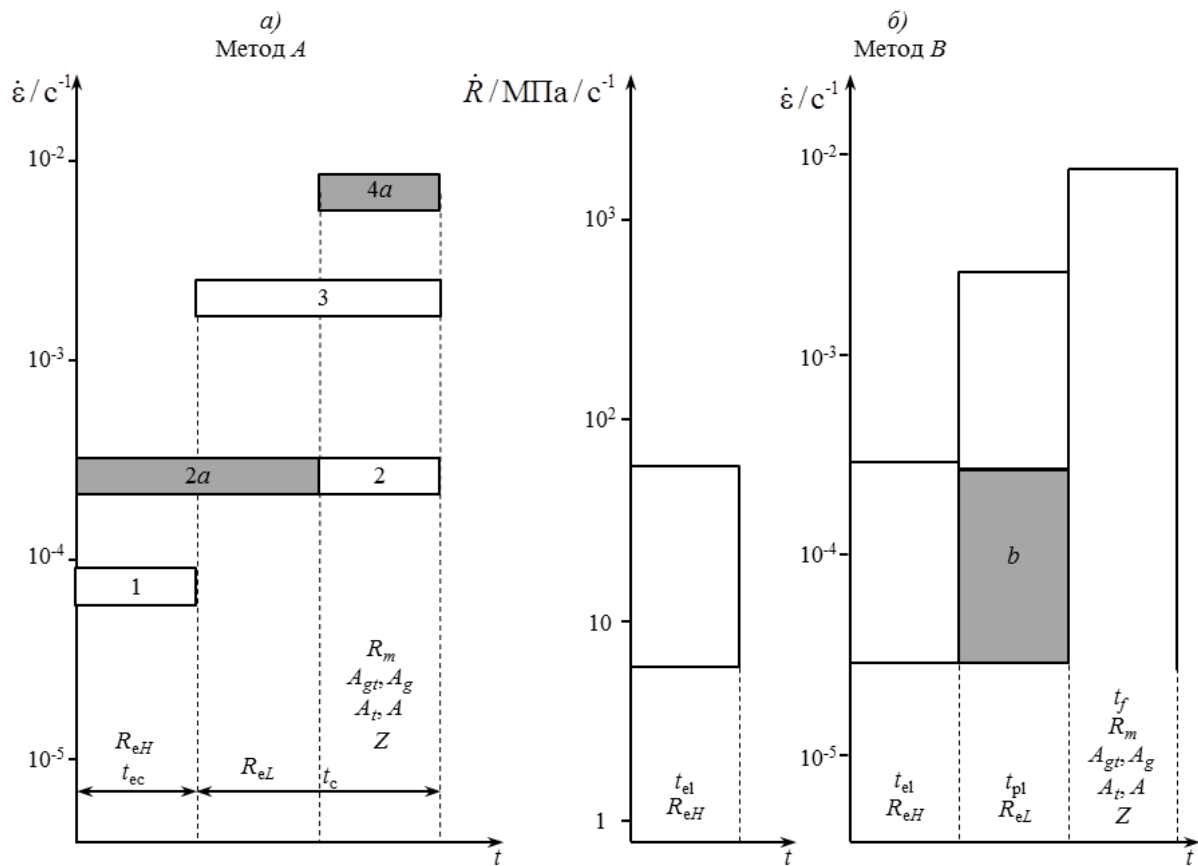


Рис. 1. Рекомендуемые стандартом EN ISO 6892-1(2009) скорости деформирования и нагружения по методам *A* (*a*) или *B* (*б*): $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования; \dot{R} – скорость возрастания напряжения; t – продолжительность испытаний; t_c – время контроля по перемещению траверсы; t_{ec} – время контроля по экстензометру; t_{el} – время упругого поведения материала и контроля по скорости нагружения; t_{pl} – время упруго-пластического поведения материала и контроля по скорости перемещения активной траверсы; t_f – время до разрушения после достижения R_m (прочности при растяжении); R_{eL} , R_{eH} – нижняя и верхняя точки «зуба» текучести; A_{gt} – полное относительное удлинение в точке максимального напряжения R_m ; A_g – остаточное (пластическое) относительное удлинение в точке максимального напряжения R_m ; A_t – полное относительное удлинение при разрыве; A – остаточное (пластическое) относительное удлинение при разрыве; Z – относительное сужение после разрыва; ■ – предпочтительные скорости проведения испытаний по методам *A* ($2a$, $4a$) и *B* (b)

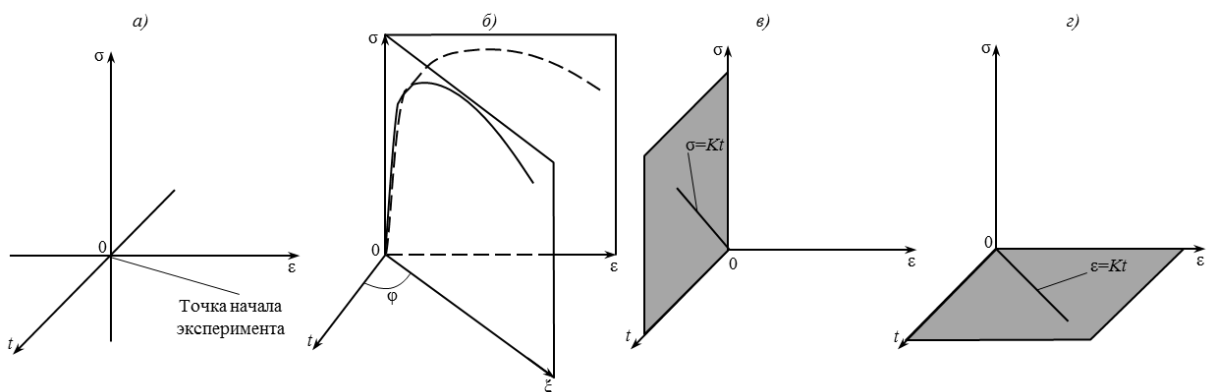


Рис. 2. Трехмерная система координат σ – ϵ – t для проведения и представления результатов

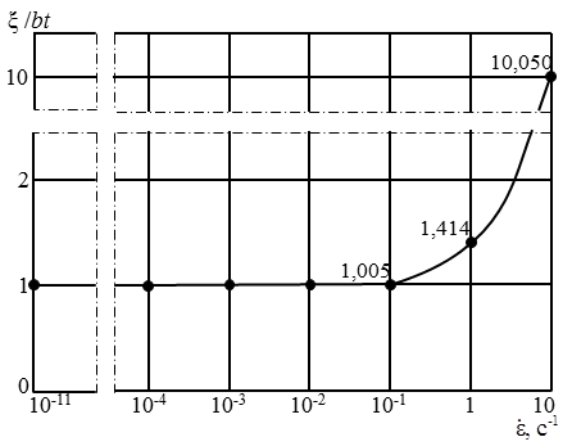


Рис. 3. Зависимость величины ξ от скорости испытания $\dot{\varepsilon}$

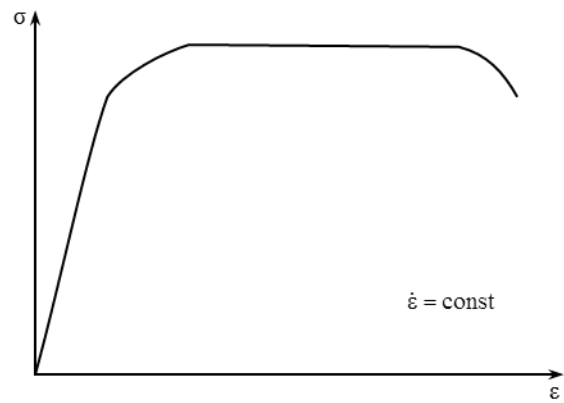


Рис. 4. Диаграмма деформирования с длительным горизонтальным участком

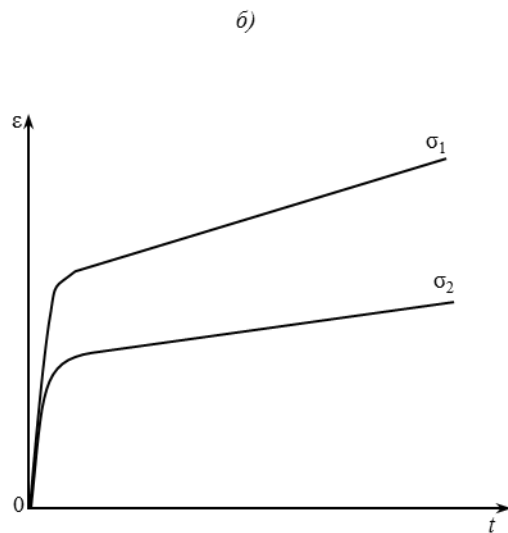
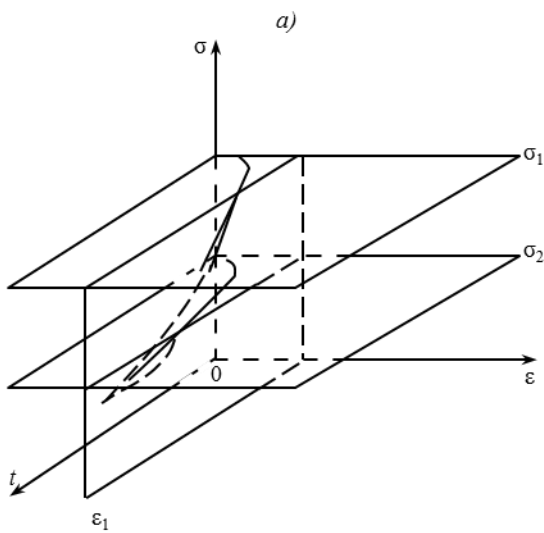


Рис. 5. Плоскости ($\sigma_1 = \text{const}$, $\sigma_2 = \text{const}$, $\varepsilon_1 = \text{const}$), определяющие силовые и деформационный критерии

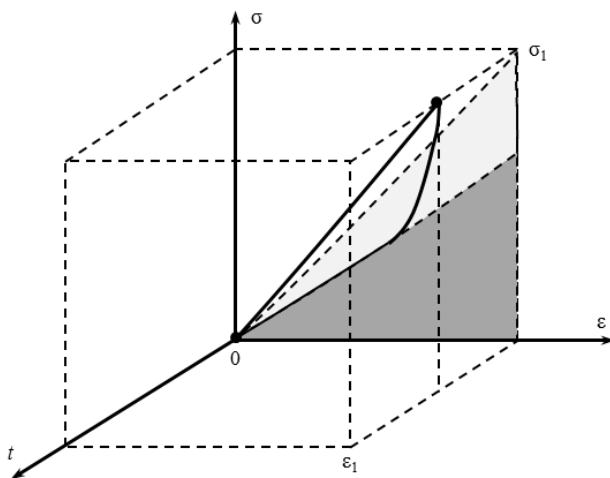


Рис. 6. Элемент в виде площади треугольника $0-\sigma_1-\varepsilon_1$ в плоскости $\sigma-0-\varepsilon$, определяющий энергетический критерий прочности

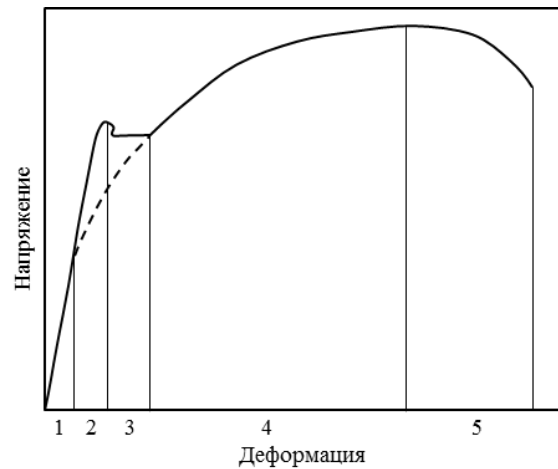


Рис. 7. Стадии пластической деформации (1-5) при испытании на растяжение

Это позволяет проводить оценку характеристик ползучести при медленном жестком нагружении.

Рассмотрим в трехмерной системе $\sigma-\varepsilon-t$ плоскости, определяющие силовые, энергетические и деформационные критерии. На рис. 5 представлены две плоскости, в каждой из которых $\sigma=\text{const}$ (силовой критерий), $\sigma_1>\sigma_2$. Показано, что при обоих напряжениях продолжается процесс пластического деформирования (ползучести) образца, т. е. продолжается процесс поглощения образцом энергии и растет его повреждаемость, что со временем может привести к полному разрушению. Перпендикулярная к этим плоскостям плоскость $\varepsilon_1=\text{const}$, являющаяся деформационным критерием, тоже не исключает роста пластической деформации за счет процесса релаксации напряжений (пунктирные кривые). Этот процесс сопровождается снижением силовой несущей способности конструкции, но не приводит к ее разрушению. Энергетический критерий можно представить в виде площади треугольника $0-\sigma_1-\varepsilon_1$ в плоскости $\sigma-0-\varepsilon$ (рис. 6). Энергетический критерий не исключает роста пластической деформации за счет процесса релаксации напряжений (кривая линия) и продолжения процесса поглощения образцом энергии. Из этого следует, что деформационный критерий (теоретически) безопаснее силового и энергетического критериев.

Деформация – сложный процесс, который происходит по стадиям [12–14]. Сначала развиваются механизмы с низкой энергией активации – упругая деформация, затем с более высокой – пластическая деформация. Разные виды пластической деформации протекают с различными скоростями [15, 16]. В сложных системах возможно двойственное поведение – бифуркация [17]. Но, как отмечено в работе [12], стадии деформации одни и те же при разных видах испытаний. Можно выделить следующие стадии деформации при испытании на растяжение (рис. 7):

1 – стадия упругой деформации (выполняется закон Гука) – упругая деформация преобладает над остальными видами деформации на участке до 0,2%, далее упругая деформация медленно растет с увеличением напряжения до σ_b , а потом снижается;

2 – стадия микротекучести – микропластическая деформация в благоприятно ориентированных зернах (в приграничном слое у поверхности образца) – от 0,2 до 0,4%;

3 – стадия текучести – повышение плотности дислокаций, неомогенная пластическая деформация, полосы Чернова–Людерса, образование субмикротрещин – от 0,4 до 1–2%;

4 – стадия деформационного упрочнения – формирование дислокационной ячеистой структуры, образование субмикротрещин на поверхности, процессы старения и фазовые превращения.

На рис. 7 цифрой 5 обозначен период распространения трещин – от начала образования шейки на образце до полного разрушения материала.

Предполагается, что при испытаниях на малоцикловую (МЦУ) и многоцикловую усталость (МнЦУ) – даже при отсутствии макродеформации – в микрообъемах идут такие же процессы пластической деформации, что и при статическом растяжении. При МЦУ или ступенчатом жестком статическом нагружении с приростом деформации, эти процессы приводят к образованию микротрещины и ее росту с каждым последующим циклом. Приведем формулы, описывающие зависимости полной деформации ε от напряжения σ при статическом растяжении в диапазоне $0\leq\sigma\leq\sigma_{\text{max}}$ (формула Ремберга–Осгуда), ползучести на участке с постоянной скоростью ползучести, усталости (отнулевой цикл):

– статическое растяжение

$$\varepsilon=\varepsilon_y+\varepsilon_{\text{пл}}=A\sigma+B\sigma^n; \quad (4)$$

– ползучесть

$$\varepsilon=\varepsilon_y+\varepsilon_{\text{пл}}=A\sigma+D\sigma^n t; \quad (5)$$

– усталость (отнулевой цикл)

$$\varepsilon=\varepsilon_y+\varepsilon_{\text{пл}}=A\sigma+\varepsilon_{\text{пл}}=2(\sigma_f/E)N^b+2\varepsilon_f N^c, \quad (6)$$

где ε – полная деформация; ε_y – упругая деформация; $\varepsilon_{\text{пл}}$ – пластическая деформация; A, B, D, n – константы, $A=1/E$, E – модуль упругости при растяжении; t – время; σ_f – коэффициент усталостной прочности; ε_f – коэффициент усталостной пластичности; N – число циклов до разрушения; b, c – параметры, характеризующие усталостную пластичность.

Видно, что представленные зависимости (4–6) имеют общие константы A и n , а также одинаковые выражения для получения полной деформации $\varepsilon_{\text{пол}}$ в виде суммы упругой (ε_y) и пластической деформаций ($\varepsilon_{\text{пл}}$).

При проведении испытаний на кратковременное растяжение скорость протекания пластической деформации не определяется в качестве характеристики материала.

Результаты

В ВИАМ разработана методика определения скорости пластической деформации при кратковременных испытаниях на статическое растяжение при жестком режиме нагружения – управление скоростью деформирования образца с помощью экстензометра, закрепленного на рабочей базе образца [15].

На рис. 8 представлена схема разделения упругой и пластической деформации на бесконечно малом участке кривой деформирования, который условно можно считать прямым. Участок AB – бесконечно малый участок диаграммы деформирования, BF – линия, параллельная диаграмме деформирования на упругом участке. Видно, что

$$d\varepsilon=d\varepsilon_y+d\varepsilon_{\text{пл}}, \quad (7)$$

где $d\varepsilon$ – полная деформация на участке AB ; $d\varepsilon_y$ – упругая деформация на этом участке; $d\varepsilon_{\text{пл}}$ – пластическая деформация.

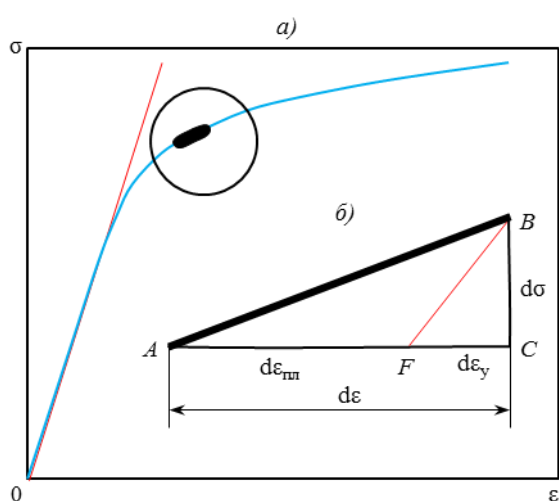


Рис. 8. Диаграмма растяжения (а) и схема разделения (б) упругой и пластической деформации на бесконечно малом участке диаграммы растяжения

Следовательно:

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon_y; \quad (8)$$

$$d\sigma = V \cdot d\varepsilon, \quad (9)$$

где E – модуль упругости 1-го рода (тангенс угла наклона упругого участка); V – тангенс угла наклона участка AB .

В результате получаем:

$$E \cdot d\varepsilon_y = V \cdot d\varepsilon; \quad (10)$$

$$E \cdot d\varepsilon_y = V(d\varepsilon_y + d\varepsilon_{пл}); \quad (11)$$

$$d\varepsilon_{пл} = d\varepsilon \left(1 - \frac{V}{E} \right); \quad (12)$$

$$\frac{d\varepsilon_{пл}}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} \left(1 - \frac{V}{E} \right). \quad (13)$$

Из формулы 13 очевидно, что на упругом участке скорость пластической деформации равна нулю. На участке, близком к пределу прочности σ_b , $V \rightarrow 0$ и, соответственно, скорость пластической

деформации $\dot{\varepsilon}_{пл} = \frac{d\varepsilon_{пл}}{dt}$ равна скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Формула (13) справедлива для участка диаграммы деформирования до величины предела прочности при растяжении σ_b , после которого происходят локализация пластической деформации и образование шейки на образце.

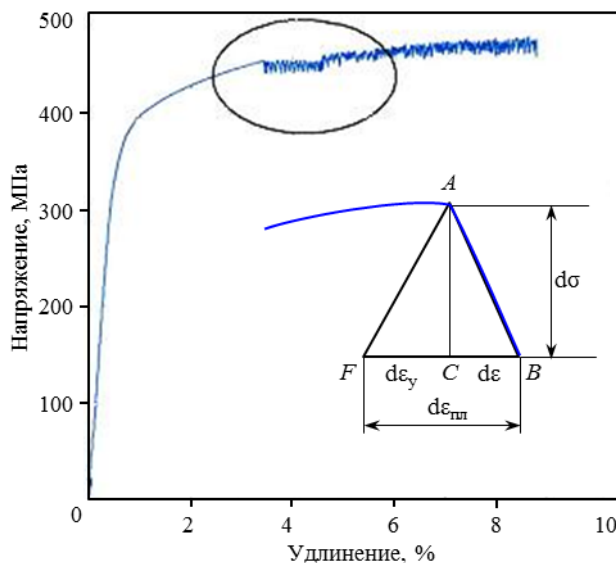


Рис. 9. Диаграмма растяжения образца из материала с эффектом Портевена–Ле-Шателье

При растяжении с малыми скоростями $\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (рис. 9) образцов из материалов с эффектом Портевена–Ле-Шателье, для участка падения напряжения – треугольник ABC (см. рис. 8) преобразуется в треугольник ABF (рис. 9), для которого также справедливо уравнение (13). В этом уравнении величина K для данного случая отрицательная и, следовательно, скорость пластической деформации больше скорости деформирования за счет релаксации упругих напряжений и отрицательно значения упругой деформации.

Обсуждение и заключения

Фактор времени является определяющим параметром при проведении механических испытаний, обработке и представлении результатов.

Представление процесса испытания и его результатов в 3D-системе осей (напряжение, деформация и время) наглядно для зрительного восприятия и позволяет сжато реализовать большой объем информации о процессе испытания и его результатах.

Показана возможность прогнозирования результатов испытаний на ползучесть с помощью результатов статических испытаний при низких скоростях деформирования, что экономически может быть очень выгодно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: Метод. пособие. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
2. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
3. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.

4. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
5. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 370–379.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ /В сб. докл. IX Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». 2012. С. 122–123.
7. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
8. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 60–64.
9. Гаденин М.М. Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначения запасов //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. №10. С. 65–70.
10. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и представлении результатов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 62–67.
11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение. 1974. С. 214–235.
12. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
13. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.
14. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г., Курганова Ю.А. Теория и практика повышения надежности и работоспособности конструкционных металлических материалов: Учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ. 2010. 268 с.
15. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р., Нужный Г.А. Определение скорости пластической деформации при испытании на растяжение //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №5. С. 61–63.
16. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
17. Шаняевский А.А. Синергетика эволюции металлов от частично замкнутой к открытой динамической системе при циклическом нагружении //Динамика сложных систем. 2007. Т. 1. №1. С. 90–104.