

УДК 620.1

В.С. Ерасов, Р.Р. Байрамуков

РОЛЬ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ, ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ И ПРЕДСТАВЛЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

На примере испытания при растяжении показана роль фактора времени при проведении механических испытаний, начиная с создания первых испытательных машин и до наших дней. Представлен переход от 1D к 3D представлению процесса испытаний, обработки данных и регистрации результатов. Предложены направления по совершенствованию испытательной техники, программного обеспечения и стандартов на испытания.

Ключевые слова: механические испытания, растяжение, влияние времени, скорость деформирования, 3D-диаграммы, стандарты на испытания.

The influence of time factor in mechanical testing (tensile tests as an example) was shown starting from the first test-machine manufacture till present. A transfer from 1D to 3D presentation of testing procedure, data processing and logging was shown. The directions on improvement of test facility, software and testing standards are offered.

Key words: mechanical tests, tensile test, influence of time, strain rate, 3D diagrams, standard test methods.

Для инженерных объектов решение проблем прочности и ресурса сводится к определению расчетных значений характеристик прочности и деформируемости и удержанию их в допустимых пределах. Все величины, определяющие свойства материала, носят вероятностный характер [1–5]. Требуется статистическое обоснование расчетных параметров, что, в свою очередь, приводит к необходимости обработки и простого визуального представления большого объема данных [6, 7]. Особое значение имеют диаграммы деформирования, по которым определяют базовые характеристики механических свойств [8]. Использование компьютеров позволяет компактизировать большое количество информации. Массив диаграмм деформации в координатах (σ ; ϵ) представлен на рис. 1.

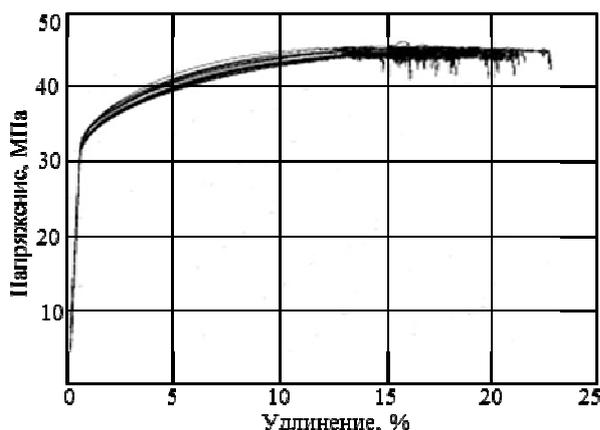


Рис. 1. Массив диаграмм деформирования в координатах (σ ; ϵ) образцов из алюминиевого сплава 1163-АТВ

Для решения задачи наглядного представления объема данных механических испытаний, на примере диаграмм деформации при растяжении пред-

ложено представление диаграмм в трехмерной системе координат (3D). Для этого к осям s и e добавлена ось времени t .

Рассмотрим историческое развитие получения и представления результатов механических испытаний. При первых механических испытаниях преобладало «мягкое» нагружение, которое осуществлялось путем приложения силы, и регистрировалась только одна величина – разрушающая нагрузка. (Испытания носили 1D характер.)

После открытия закона Гука в 1660 году понадобилось не одно столетие, чтобы перейти от зависимости

$$P=K\Delta l, \quad (1)$$

где P – нагрузка; Δl – абсолютное удлинение; K – коэффициент упругости,

к зависимости

$$\sigma=E \cdot \epsilon, \quad (2)$$

где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении; ϵ – относительное удлинение; E – модуль упругости (модуль Юнга или модуль упругости первого рода).

Этот переход позволил оценить свойства именно материала, а не конструкции, как раньше.

При регистрации результатов испытаний в 2D-системе координат регистрировали зависимость напряжения от деформации: «жесткое» нагружение, при котором задается деформация образца, а регистрируется соответствующее данной деформации напряжение (см. рис. 1)

$$\sigma=F(\epsilon). \quad (3)$$

Основное преимущество «жесткого» нагружения перед «мягким» – получение диаграмм деформирования при большой скорости пластической деформации в образце, когда напряжение остается постоянным (площадка текучести) или даже падает (зуб текучести), что невозможно при «мягком» нагружении.

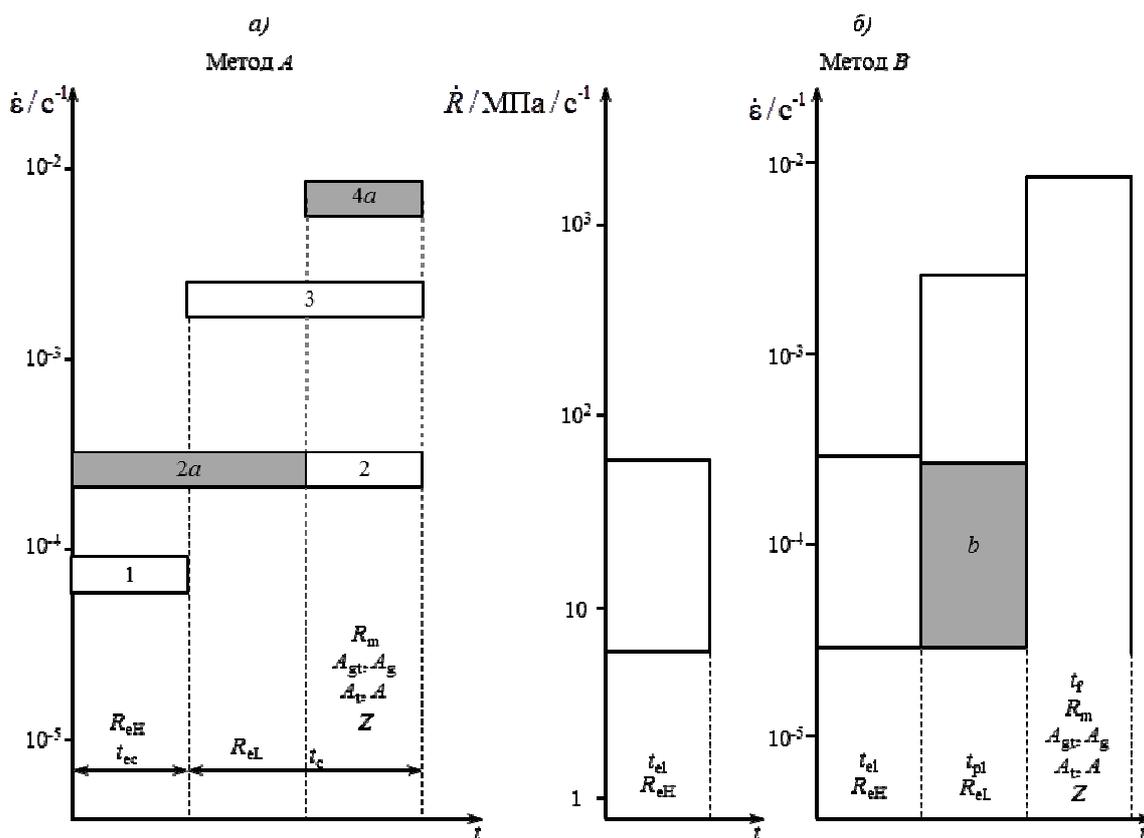


Рис. 2. Рекомендуемые стандартом EN ISO 6892-1(2009) скорости деформирования и нагружения по методу *A* (*a*) и *B* (*б*): $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования; \dot{R} – скорость возрастания напряжения; t – начало испытания; t_c – контроль по перемещению траверсы; t_{ec} – контроль по экстензометру или перемещению траверсы; t_{el} – упругое поведение материала; t_{pl} – пластическое поведение материала; t_f – время до разрушения; R_{eL} , R_{eH} – нижняя и верхняя точки зуба текучести; R_m – прочность при растяжении; A_{gr} – полное относительное удлинение в точке максимального напряжения; A_g – остаточное (пластическое) относительное удлинение в точке максимального напряжения; A_t – полное относительное удлинение при разрыве; A – остаточное (пластическое) относительное удлинение при разрыве; Z – относительное сужение после разрыва; ■ – показаны предпочтительные скорости проведения испытаний (деформирования) – $2a$, $4a$ (по методу *A*) и b (по методу *B*) – в случае отсутствия возможности управления по экстензометру

В настоящее время методику испытания определяют международные стандарты EN ISO 6892-1 (2009) Metallic Materials – Tensile Testing, ASTM E8-08 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Скорости испытания по EN ISO 6892-1(2009) могут быть выбраны по методам *A* или *B* (рис. 2). По методу *A* скорости испытания контролируются по экстензометру, закрепленному на рабочей части образца, по методу *B* – по изменению напряжения на упругом участке и перемещению активной траверсы после появления пластической деформации. Предпочтение следует отдать методу *A* как более современному.

Задача стандартизации механических испытаний заключается в создании условий, при которых образцы материалов будут испытываться в одинаковых условиях [9]. Это необходимо для получения достоверных сравнимых результатов.

Преимущества 3D представления процесса и результатов испытаний

С введением цифрового компьютерного управления регистрация результатов испытаний происходит в трехмерной системе координат (3D). Испытание проходит в трехмерной системе $(\sigma; \epsilon; t)$ (рис. 3). Далее будем рассматривать только 1/8 часть этого пространства, где проходит испытание при растяжении и регистрация результатов.

Диаграмма в плоскости $(\sigma; 0; \epsilon)$ существует только как проекция диаграммы из 3D-системы в 2D-систему, как показано на рис. 3, б. Две другие плоскости $(\sigma; 0; t)$ и $(\epsilon; 0; t)$ (см. рис. 3, в, г) – соответственно «мягкого» и «жесткого» нагружения, где происходит управление нагружением при испытании. В случае управления испытанием в «жестком» режиме – испытание регистрируют в плоскости $(\sigma; 0; \xi)$ (см. рис. 3, б). Здесь ось ξ – пересечение этой плоскости с плоскостью $(\epsilon; 0; t)$.

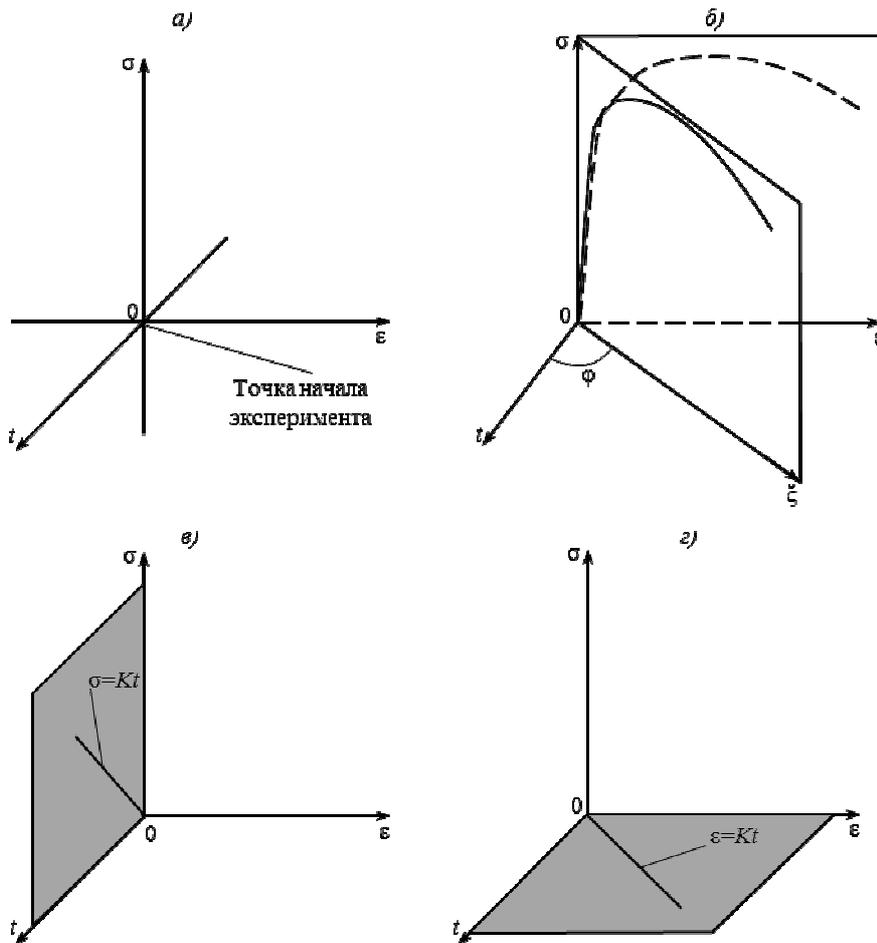


Рис. 3. Трехмерная (3D) система координат для проведения испытаний и представления результатов (а). Диаграмма деформации в 3D-системе и ее проекция на плоскость $(\sigma; 0; \epsilon)$ (б). Плоскость «мягкого» нагружения $(\sigma; 0; t)$ с линейной функцией управления $\sigma=Kt$ (в) и плоскость «жесткого» нагружения $(\epsilon; 0; t)$ с линейной функцией управления $\epsilon=Kt$ (г)

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

$$\xi = \sqrt{\epsilon^2 + (bt)^2} = t\sqrt{\dot{\epsilon}^2 + b^2}, \quad (4)$$

где ϵ – скорость деформирования образца на рабочей длине; $b=1 \text{ с}^{-1}$ – коэффициент, приводящий к одинаковой размерности складываемых величин.

Следует иметь в виду, что $\dot{\epsilon} = \text{tg}\phi$, где ϕ – угол между плоскостями $(\sigma; 0; x)$ и $(\sigma; 0; t)$. Чем меньше ϕ (или $\dot{\epsilon}$), тем больше напряжение σ зависит только от фактора времени, тем ближе плоскость $(\sigma; 0; \xi)$ к плоскости $(\sigma; 0; t)$ и тем ближе «жесткое» нагружение к «мягкому». И наоборот, чем меньше величина K при «мягком» нагружении по закону $\sigma=Kt$ (см. рис. 3, в), тем ближе «мягкое» нагружение к «жесткому», т. е. при нагружениях, оси которых (ξ на рис. 3, б) близки к оси времени t , «мягкое» и «жесткое» нагружение могут быть взаимозаменяемыми.

Представлена зависимость величины ξ от скорости испытания $\dot{\epsilon}$ (рис. 4). При малых скоростях испытания ($\dot{\epsilon} \rightarrow 0$) величина $\xi \rightarrow bt$. Это позволяет сделать вывод о том, что при малых скоростях

испытания время является определяющим параметром: $\sigma(\epsilon) \rightarrow \sigma(t)$, плоскость $(\sigma; 0; \xi)$ находится рядом с плоскостью $(\sigma; 0; t)$, $\phi \rightarrow 0$ (см. рис. 3, б).

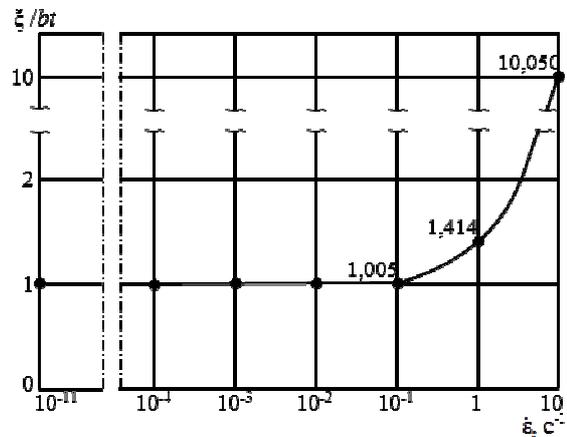


Рис. 4. Влияние скорости испытания ($\dot{\epsilon}$) на величину ξ

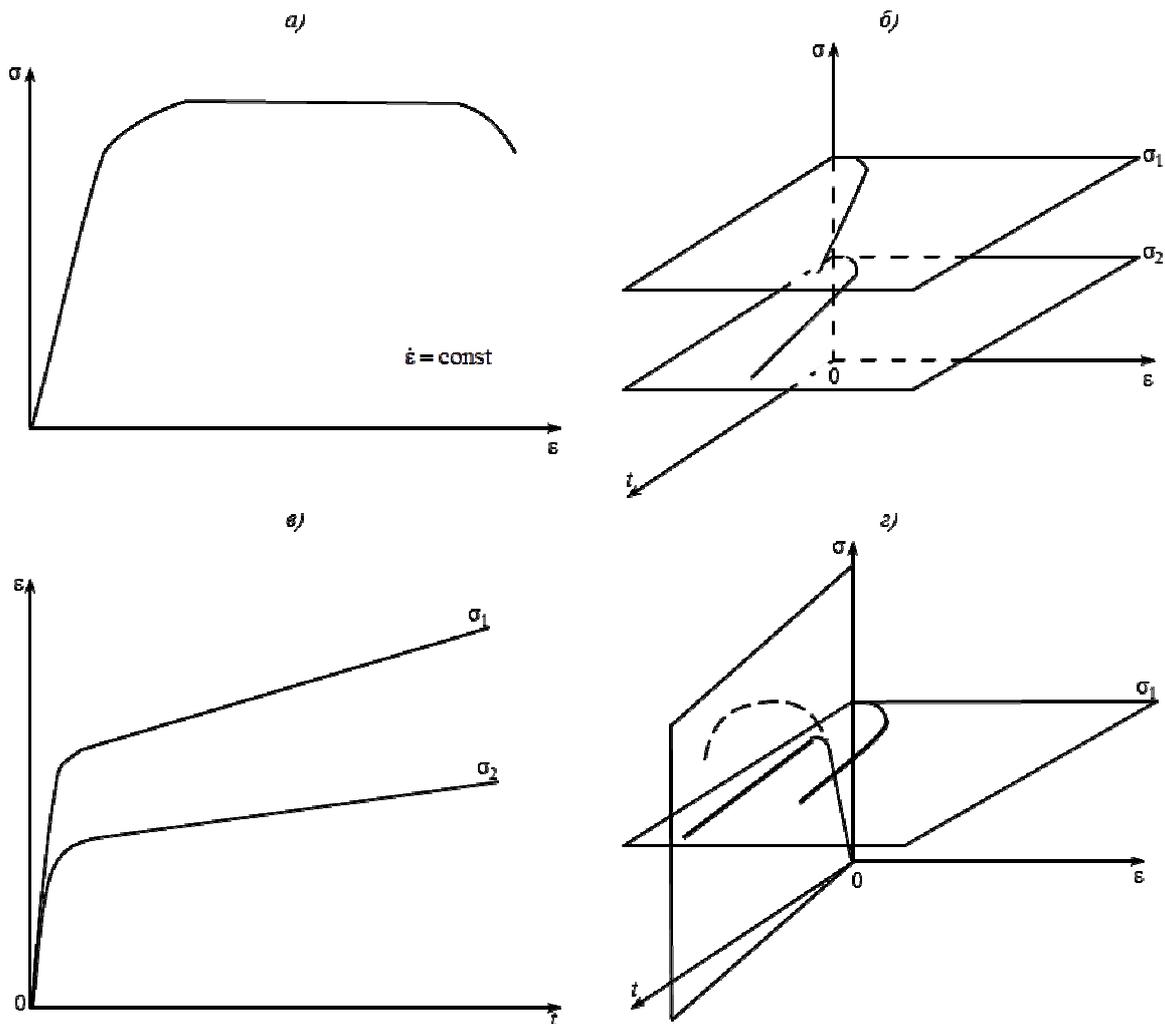


Рис. 5. Диаграмма с горизонтальным участком (а). Плоскости ползучести с диаграммами (б) и их проекция на (ε; 0; t) (в). Пересечение плоскости регистрации ползучести и плоскости регистрации при «жестком» нагружении (г)

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 [10]. Парадокс заключается в том, что временной фактор является важным, но при этом его не учитывают.

При построении диаграмм механических испытаний встречаются диаграммы деформирования с выраженным горизонтальным участком (рис. 5, а). На этом участке:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = 0, \tag{5}$$

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.

Рассмотрим плоскости, в которых регистрируется испытание на ползучесть. Две плоскости, в каждой из которых $\sigma = \text{const}$, $\sigma_1 > \sigma_2$, представлены

на рис. 5, б, в. Диаграммы ползучести и их проекции на (ε; 0; t) показывают: $\dot{\varepsilon}_1 > \dot{\varepsilon}_2$. Далее рассмотрим рис. 5, г, на котором пересекаются плоскости регистрации при испытании на ползучесть и при «жестком» нагружении. Скорость «жесткого» нагружения выберем равной скорости ползучести при напряжении σ_1 (*жирный прямолинейный участок* на диаграмме ползучести). Из рис. 5, г видно, что при «жестком» нагружении выше напряжения σ_1 диаграмма деформации не поднимется. При этом напряжении материалу образца энергетически выгодно «ползти» (*жирный участок* на диаграмме растяжения). Если взять две точки друг над другом: одну на *жирной линии*, другую на *пунктирной* (предполагаемая линия деформирования), то напряжение соответствующее первой точке будет меньше, чем напряжение, соответствующее второй точке, а деформация в обеих точках одинакова. Таким образом, на *жирной линии* потенциальная энергия, запасенная в образце, меньше, чем на *пунктирной линии*.

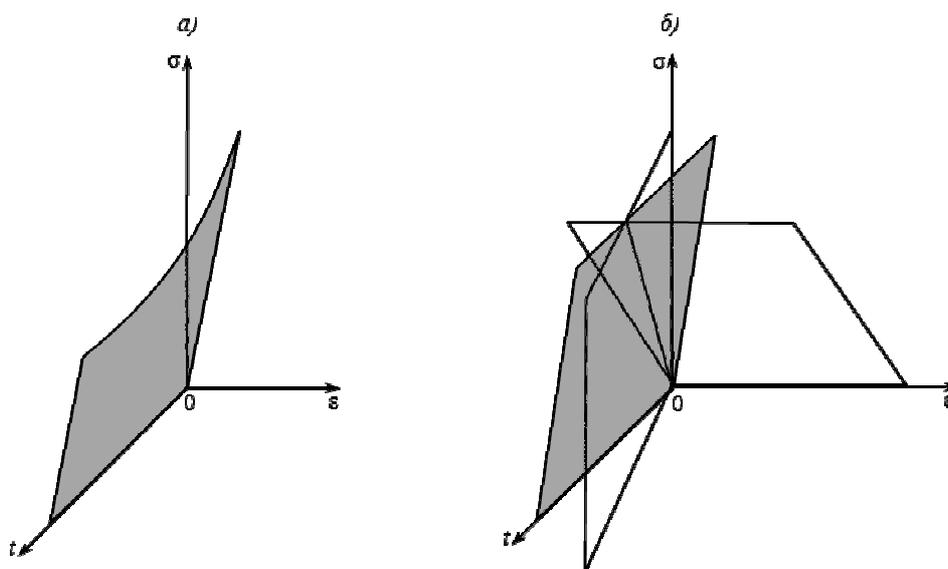


Рис. 6. 3D-поверхность «упругости» (а). Упругая прямая, получаемая при пересечении 3D-поверхности плоскостями регистрации испытания при «жестком» и «мягком» нагружении (б)

Следовательно, активное растяжение при малой скорости деформации на участке $\sigma = \text{const}$ – ползучесть.

С помощью поверхности, образованной множеством 3D-диаграмм деформации при разных скоростях испытания, можно получить свойства материала как при статических испытаниях, так и при ползучести. Назовем эту поверхность 3D-поверхностью деформации. Реально работа проводится с набором таких поверхностей, лежащих между поверхностями с максимальными и минимальными значениями механических характеристик [11–14].

Рассмотрим 3D-поверхность, образованную множеством диаграмм, в упругой области при разных скоростях испытания (рис. 6). Интересна 3D-поверхность упругости тем, что является плоскостью и содержит в себе ось времени. Это свидетельствует о том, что время не имеет никакого значения на стадии упругости. Однако ее верхняя граница является нисходящей по времени. Она примечательна также и тем, что плоскости регистрации испытания и при «мягком», и при «жестком» нагружении (при соблюдении условия $\dot{\sigma} = E \cdot \dot{\epsilon}$), пересекая ее, дают одну и ту же прямую, т. е. на упругом участке не имеет значения и способ нагружения (рис. 6, б). Таким образом, современные стандарты весьма правомерно разрешают контроль скорости по напряжению на упругом участке.

Схематичный полный вид 3D-поверхности для металлического материала показан на рис. 7.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

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

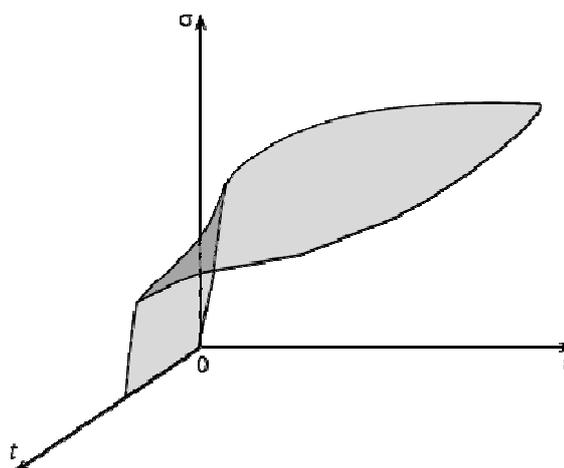


Рис. 7. Схематичный вид 3D-поверхности для металлического материала

2. Представление процесса испытания и его результатов в 3D-системе координат (напряжение, деформация, время):

- визуализирует реальные процессы управления испытанием и регистрации его результатов, является наглядным материалом в процессе обучения;
- компактизирует в пространстве процессы испытания и регистрации результатов.

3. Полученные результаты показывают возможность прогнозирования испытаний на ползучесть статическими испытаниями при низких скоростях деформирования, что будет экономически выгодно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А. Система критериев прочности, ресурса, надежности и безопасности машин и конструкций //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. №9. С. 50–55.
2. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: Методич. пособ. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
3. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я. и др. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
4. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследование прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
5. Каблов Е.Н., Гриневич 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. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-02). Atlantic City: NJ. 2005. 1826 p.
7. 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.
8. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: Справочник. М.: ОАК. 2009. Вып. 1. 268 с.
9. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
10. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение. 1974. С. 214–235.
11. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Закономерности поведения ВЭ деформаций в авиационных стеклах из линейных и поперечносшитых полимеров при знакопеременных нагрузках //Авиационная промышленность. 2011. №3. С. 28–32.
12. Беляев М.С., Кошкин С.Б., Горбовец М.А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 27–30.
13. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.
14. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 191 с.