

УДК 620.1

В.С. Ерасов<sup>1</sup>, В.В. Автаев<sup>1</sup>, Е.И. Орешко<sup>1</sup>, Н.О. Яковлев<sup>1</sup>

## ПРЕИМУЩЕСТВА «ЖЕСТКОГО» НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТАТИЧЕСКОЕ И ПОВТОРНО-СТАТИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104

*Представлены преимущества «жесткого» нагружения над «мягким» нагружением при испытаниях на статическое растяжение, а также повторно-статическое (усталостное) нагружение с фиксированным шагом увеличения деформации с каждым последующим циклом. В дополнение к традиционным механическим характеристикам материалов (модуль упругости  $E$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , прочность при растяжении  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta$ ), получаемым из диаграммы деформирования при испытании на растяжение, предложено введение дополнительных характеристик (скорость пластической деформации  $\dot{\epsilon}_n$ , функция повреждаемости материала образца  $\omega$  и скорость повреждаемости  $v$ ) при условии получения диаграммы деформирования при «жестком» нагружении ( $\dot{\epsilon} = \text{const}$ ). Представлена взаимосвязь диаграммы растяжения с огибающей линией при повторно-статическом «жестком» нагружении с фиксированным шагом увеличения деформации с каждым последующим циклом. Для сплавов 1441-T1 и 1163-ATB при повторно-статическом нагружении наблюдается характерный эффект, при котором пластическая деформация в определенном диапазоне деформаций реализуется дискретно при одинаковых напряжениях (подобно площадке текучести при растяжении). Для сплава В-1481-T1 подобный эффект отсутствует.*

**Ключевые слова:** механические испытания, механические характеристики, «жесткое» нагружение, растяжение, усталость, функция повреждаемости.

V.S. Erasov<sup>1</sup>, V.V. Avtaev<sup>1</sup>, E.I. Oreshko<sup>1</sup>, N.O. Yakovlev<sup>1</sup>

## STRAIN-CONTROLLED TESTING ADVANTAGES AT STATIC TENSION AND REPEATED-STATIC TENSION

*The article presents advantages strain-controlled testing over force-controlled testing at static tension and repeated-static (fatigue) with a fixed deformation step. In addition to the traditional mechanical properties of materials (elastic modulus  $E$ , yield strength  $\sigma_{0,2}$ , tensile strength  $\sigma_b$ , permanent deformation  $\delta$ ), obtained from the stress-strain diagram at tensile test, introduction of additional characteristics (plastic deformation rate  $\dot{\epsilon}_n$ , material damage function of the specimen  $\omega$ , damage velocity  $v$ ) subject to stress-strain diagram with strain-controlled testing is suggested. The stress-strain diagram relationship with the envelope of the line when the strain-controlled repeated-static testing with a fixed deformation step introduced. Approaches to determining fatigue characteristics using test data in this manner at fatigue testing are showing. For 1441-T1 and 1163-ATB alloys under repeated-static testing, a characteristic effect is observe. A plastic deformation in a certain deformation range is realize discretely at the same stresses (similar to the yield plateau during tension). For alloy В-1481-T1, there is no similar effect.*

**Keywords:** mechanical testing, mechanical characteristics, strain-controlled testing, tension, fatigue, damage function.

<sup>1</sup>Федеральное 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

В соответствии с современными расчетами на прочность конструкции должны эксплуатироваться в упругой области нагружения. Однако при эксплуатации в течение длительного времени, даже в этих условиях может происходить интенсивная трансформация структуры и реализация основных механизмов деградиационных процессов [1]. В местах концентрации напряжений возможна локальная пластическая деформация, которая может привести к появлению магистральной трещины и разрушению конструкции [2]. Более того, современное проектирование летательных аппаратов по принципу «безопасного повреждения» допускает появление и развитие в конструкции повреждения некритических размеров, которое во время эксплуатации должно быть обнаружено [3], а конструкция при плановом ремонте отремонтирована. Поэтому исследование процесса повреждаемости материала (развития сначала пластической деформации, а затем появления и развития трещин) необходимо для обоснования условий эксплуатации и ресурса конструкций.

Наиболее распространенным и информативным способом определения механических характеристик материалов для расчетов конструкций на прочность являются испытания на статическое растяжение [4]. Результатом испытания на статическое растяжение является диаграмма деформирования в координатах  $\sigma$ – $\varepsilon$ , которая дает наглядное представление о поведении материалов и значениях их механических свойств в упругой и пластической областях.

Исторически сложилось так, что первые механические испытания проводили при «мягком» нагружении, при котором к образцу прикладывали силу и регистрировали только одну величину – разрушающую нагрузку. Затем стали регистрировать зависимость напряжения от деформации и перешли к «жесткому» нагружению, когда задается деформация ( $\varepsilon$ ) образца, а регистрируется соответствующее данной деформации напряжение ( $\sigma$ ):

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

Особенностью «жесткого» нагружения, в отличие от «мягкого», является возможность получения диаграмм деформирования при большой скорости протекания пластической деформации в образце, когда напряжение остается постоянным (плато текучести) или даже падает (зуб текучести или эффект Портвена–Ле-Шателье), что невозможно при «мягком» нагружении. Метод «жесткого» нагружения требует наличия жесткой силовой цепочки «образец–испытательная машина» и проведения испытания при контроле скорости деформирования ( $\dot{\varepsilon}$ ) рабочей части образца с помощью закрепленного на рабочей части датчика деформации (рис. 1).

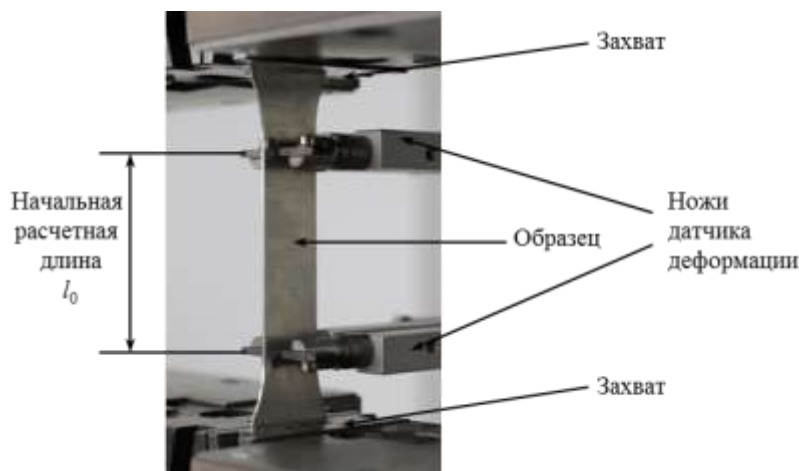


Рис. 1. Испытание при контроле скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$  рабочей части образца с помощью закрепленного на рабочей части датчика деформации

При рассмотрении стандартного механического испытания следует отметить, что оно реализуется в трехмерной системе координат  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $t$ . Испытание на растяжение и регистрация результатов проходят только в 1/8 части этого пространства, ограниченном плоскостями  $\sigma$ - $\varepsilon$ ,  $\varepsilon$ - $t$  и  $\sigma$ - $t$ . Диаграмма на плоскости  $\sigma$ - $\varepsilon$  является проекцией диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $t$  из трехмерной системы в 2D-систему, две другие плоскости  $\sigma$ - $t$  и  $\varepsilon$ - $t$  – соответственно плоскости «мягкого» и «жесткого» нагружения, где происходит управление нагружением при испытании.

В случае управления испытанием в «жестком» режиме – испытание регистрируют в плоскости  $\sigma$ - $\xi$  (рис. 2), где ось  $\xi$  – линия пересечения этой плоскости с плоскостью  $\varepsilon$ - $t$ .

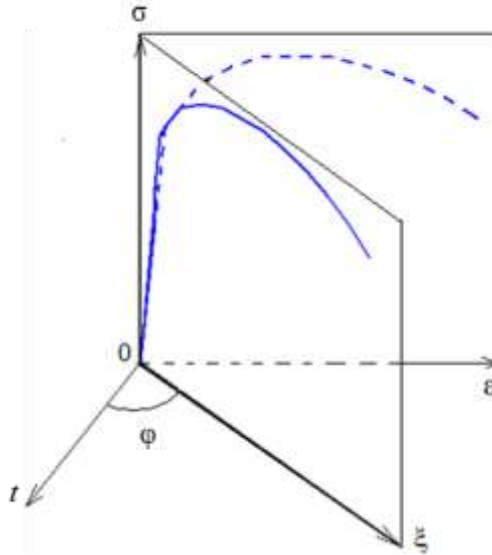


Рис. 2. Представление диаграммы деформирования в трехмерной системе координат и ее проекция на плоскость  $\sigma$ - $\varepsilon$

Величина  $\xi$  выражается через  $\varepsilon$ ,  $t$  и  $\dot{\varepsilon}$  [5]:

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

где  $\varepsilon$  – абсолютная деформация образца;  $t$  – время деформирования образца;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформирования образца на рабочей длине,  $\text{с}^{-1}$ ;  $b$  – коэффициент, приводящий к одинаковой размерности складываемых величин,  $\text{с}^{-1}$ .

Скорость деформирования образца на рабочей длине  $\dot{\varepsilon} = t \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между плоскостями  $\sigma$ - $\xi$  и  $\sigma$ - $t$ . Чем меньше угол  $\varphi$ , тем больше напряжение зависит от фактора времени, тем ближе плоскость  $\sigma$ - $\xi$  к плоскости «мягкого» нагружения  $\sigma$ - $t$ . Совокупность диаграмм, полученных при различных скоростях деформирования образцов в пространстве  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $t$ , позволяет получить поверхность деформирования  $\sigma = F(\varepsilon, t)$ . «Жесткое» нагружение в сочетании с высокой жесткостью современных испытательных машин позволяет ввести в практику оценки механических свойств материалов такую характеристику, как скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_п$  [6–8], а также оценивать процесс повреждаемости с помощью функции повреждаемости материала образца  $\omega$  [9–11].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

### Материалы и методы

Методика определения скорости пластической деформации основана на разделении общей деформации на упругую и пластическую составляющие. В диапазоне

напряжений  $0 \leq \sigma \leq \sigma_{\max}$  для описания диаграммы деформирования можно использовать формулу Ремберга–Осгуда [13], описывающую зависимость полной деформации  $\varepsilon$  от напряжения  $\sigma$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n = A\sigma + B\sigma^n, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – полная деформация;  $\varepsilon_y$  – упругая деформация;  $\varepsilon_n$  – пластическая деформация;  $A, B, n$  – константы;  $A=1/E$ ,  $E$  – модуль упругости при растяжении;  $B=0,002(1/\sigma_{0,2})^n$ ,  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести.

Оценку скорости пластической деформации проводили на образцах из листов алюминий-литиевого сплава 1424. Исследование эффекта циклической ползучести проводили на образцах из листов алюминиевого сплава 1163-АТВ и алюминий-литиевых сплавов 1424, 1441-Т1 и В-1481-Т1 [14].

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлено схематическое разделение полной деформации на упругую и пластическую деформации на бесконечно малом участке  $AB$  кривой деформирования, который условно можно считать прямым ( $BF$  – линия, параллельная упругому участку). Видно, что полная деформация участка  $AB$

$$d\varepsilon = d\varepsilon_y + d\varepsilon_n, \quad (4)$$

где  $d\varepsilon_y$  и  $d\varepsilon_n$  – упругая и пластическая деформации,

тогда приращение напряжения составит

$$d\sigma = E d\varepsilon_y; \quad (5)$$

$$d\sigma = K d\varepsilon, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости (тангенс угла наклона упругого участка);  $K$  – тангенс угла наклона участка  $AB$ .

Приравняв формулы (5) и (6) и выразив  $d\varepsilon_y$  из формулы (4), получим

$$d\varepsilon_n = d\varepsilon \left( 1 - \frac{K}{E} \right). \quad (7)$$

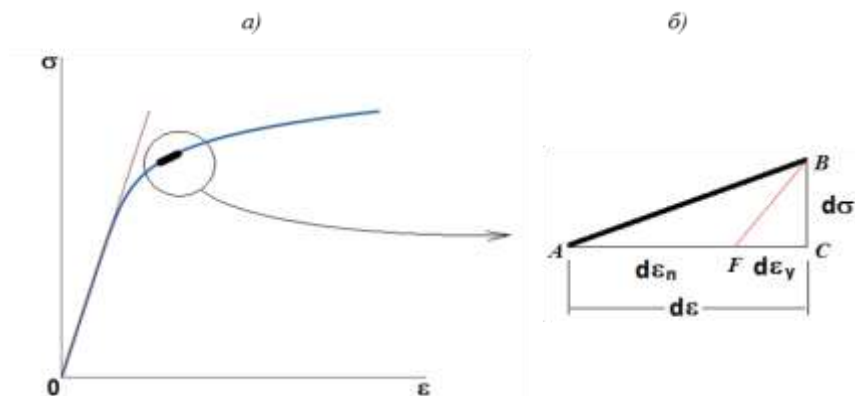


Рис. 3. Диаграмма растяжения (а) и схематичное разделение полной деформации на упругую и пластическую деформации на бесконечно малом участке диаграммы растяжения (б)

Продифференцировав уравнение (7) по времени  $t$ , получим зависимость скорости пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_n$  от  $K$  при скорости деформирования образца  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ :

$$\dot{\varepsilon}_n = \dot{\varepsilon} \left( 1 - \frac{K}{E} \right). \quad (8)$$

На рис. 4, а представлены диаграмма деформирования без площадки текучести образца из листа алюминий-литиевого сплава 1424 и зависимость величины  $K$  от значений деформации на этой части диаграммы. Образец деформировали при комнатной температуре со скоростью  $\dot{\epsilon}_п = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  до первого спада деформации, характеризующего развитие эффекта Портвена–Ле-Шателье. Изменение скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}_п$  показано на рис. 4, б. Для построения зависимостей  $K$  и скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}_п$  от деформации выбран шаг по деформации, равный 0,1%, для дискретного дифференцирования методом секущих.

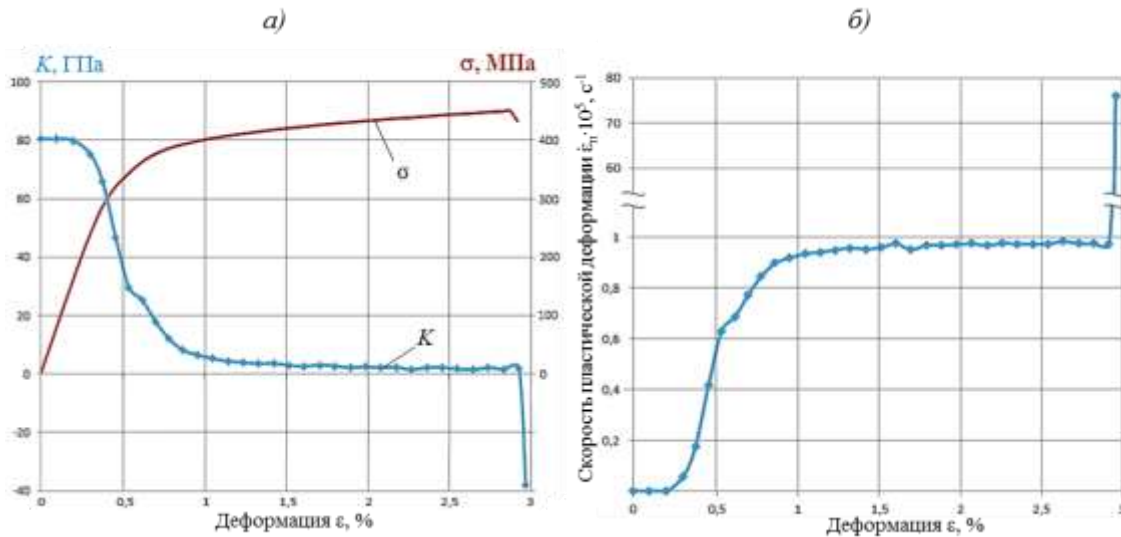


Рис. 4. Начальный участок диаграммы деформирования образца из листа алюминий-литиевого сплава 1424 и изменение величин  $K$  (а) и скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}_п$  (б) в процессе деформирования

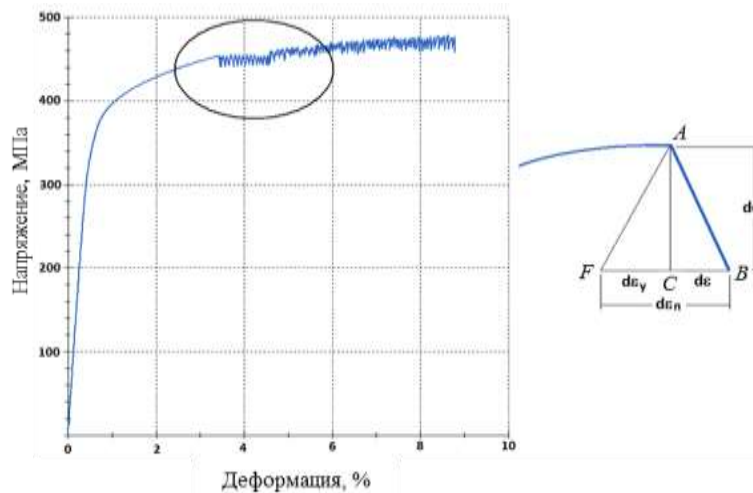


Рис. 5. Диаграмма деформирования образца из листа алюминий-литиевого сплава 1424 со скоростью  $\dot{\epsilon}_п = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и разделение полной деформации на упругую и пластическую части при эффекте Портвена–Ле-Шателье

Полная диаграмма деформирования образца из листа алюминий-литиевого сплава 1424 при комнатной температуре, но уже со скоростью  $\dot{\epsilon}_п = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , представлена на рис. 5. Для участка падения напряжения (линия  $AB$ ) получаем по аналогии с треугольником  $ABC$  (рис. 3) деление полной деформации на упругую и пластическую части

в треугольнике  $ABF$ , для которого также справедливо уравнение (7). В уравнении (7) величина  $K$  для данного случая из-за отрицательного значения упругой деформации также отрицательна и, следовательно, скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_п$  больше скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$ .

Полученные результаты показывают возможность определения скорости пластической деформации образца  $\dot{\varepsilon}_п$  при статическом растяжении (при скорости деформирования образца  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ ) путем разделения полной деформации на упругую и пластическую составляющие. Определяемая таким образом скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_п$  (по условиям роста деформации) может быть соотнесена со скоростью установившейся ползучести. В работе [15] можно найти подтверждение этого, анализируя результаты испытания титанового сплава ВТ20 в условиях высоких температур. В трехмерной системе координат  $\sigma$ – $\varepsilon$ – $t$  на рис. 6 проиллюстрированы условия, при которых скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_п$  может быть равна скорости установившейся ползучести. Определение характеристик ползучести при испытании на статическое растяжение экономически очень выгодно, но требует дополнительных исследований.

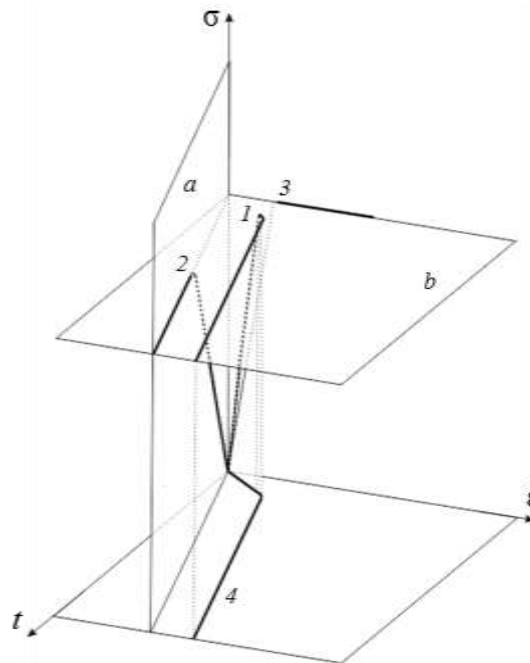


Рис. 6. Представление диаграммы деформирования в трехмерной системе координат: 1 – диаграмма ползучести в пространстве; 2 – теоретическая диаграмма растяжения при «жестком» нагружении со скоростью, равной скорости установившейся ползучести; 3 – проекция диаграммы ползучести на плоскость  $\sigma$ – $\varepsilon$ ; 4 – диаграмма ползучести;  $a$  – плоскость «жесткого» нагружения растяжением со скоростью, равной скорости установившейся ползучести материала;  $b$  – плоскость с постоянными напряжениями

Знание процесса повреждаемости материала (развития сначала пластической деформации, а затем появления и развития трещин) необходимо для обоснования условий эксплуатации и ресурса конструкций. В данной работе, исходя из деформационного описания процесса повреждаемости образца из металлического материала при его статическом растяжении, представлена функция повреждаемости  $\omega$ , которая изменяется от 0 – исходное состояние образца, до 1 – разрушенный или исчерпавший деформационный ресурс образец.

Разделение деформаций, согласно формуле Ремберга–Осгуда, удобно при описании различных условий статического нагружения. Упругая деформация  $\varepsilon_y$  характеризует

силовую несущую способность конструкции (или для образца – обратимые деформации), в то время как величина пластической деформации  $\varepsilon_{\text{п}}$  – повреждаемость (или для образца – необратимые деформации). В этом случае необходимо выбрать критическое значение относительной пластической деформации  $\varepsilon_{\text{п}}$ , которое обозначим  $\varepsilon_{\text{дп}}$ , т. е.  $\varepsilon_{\text{дп}}$  – допустимая величина пластической деформации при кратковременном растяжении. Определив  $\varepsilon_{\text{дп}}$ , можно получить текущее значение функции повреждаемости  $\omega(t)$  от времени  $t$ , представив процесс повреждаемости в виде:

$$\omega(t) = \frac{1}{\varepsilon_{\text{дп}}} \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{п}}(t) dt, \quad (9)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{\text{п}}(t)$  – скорость развития пластической деформации на рабочей базе образца в процессе его испытания.

Производная повреждаемости по времени (скорость повреждаемости), в соответствии с уравнением (9), равна

$$v(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{дп}}} \dot{\varepsilon}_{\text{п}}(t). \quad (10)$$

Скорость повреждаемости, как и величина самой повреждаемости, может служить критерием для расчетов ресурса работы конструкции. Размерность получаемой величины  $\text{с}^{-1}$ . Следует учесть и тот факт, что контроль состояния металлических конструкций часто реализуют с помощью датчиков деформации.

Деформация – сложный процесс, она развивается по стадиям [16, 17]. Сначала реализуются механизмы деформации с низкой энергией активации (упругая деформация), затем – с более высокой энергией активации (пластическая деформация). Разные виды пластической деформации протекают с различными скоростями, но, как отмечено в работе [16], стадии деформации одни и те же при разных видах испытаний. При испытании на растяжение выделяют следующие схематично представленные на рис. 7, а стадии деформации.

1. Упругая деформация – выполняется закон Гука, упругая деформация преобладает над остальными видами деформации на участке до 0,2%.

2. Микротекучесть – микропластическая деформация в благоприятно ориентированных зернах, в приграничном слое у поверхности образца – от 0,2 до 0,4%.

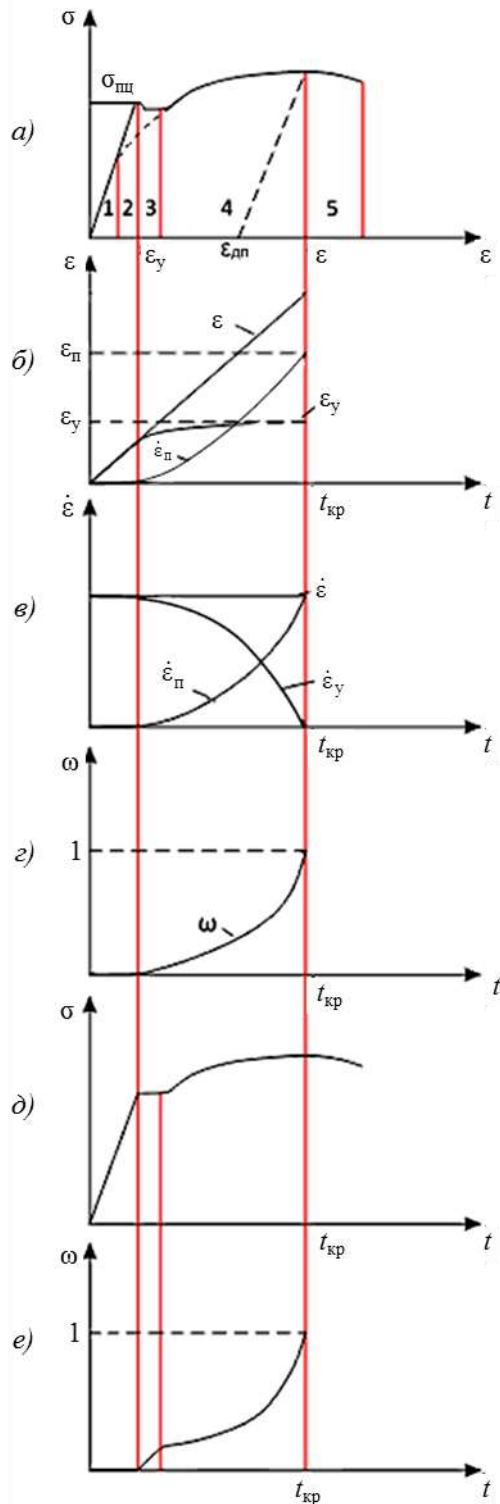
3. Текучесть – повышение плотности дислокаций, негомогенная пластическая деформация, полосы Чернова–Людерса, образование субмикротрещин – от 0,4 до 1–2%.

4. Деформационное упрочнение – формирование дислокационной ячеистой структуры, образование субмикротрещин на поверхности, процессы старения и фазовые превращения.

5. Распространение трещин – от начала шейкообразования до полного разрушения материала.

На рис. 7, а, б представлены схемы типичных графиков развития во времени полной  $\varepsilon$ , упругой  $\varepsilon_{\text{у}}$  и пластической деформаций  $\varepsilon_{\text{п}}$  при «жестком» нагружении растяжением образцов, имеющих диаграмму деформирования без площадки текучести (на рис. 7, а эта часть диаграмм отмечена пунктирной кривой линией). На рис. 7, в показаны зависимости скорости полной  $\dot{\varepsilon}$ , упругой  $\dot{\varepsilon}_{\text{у}}$  и пластической деформаций  $\dot{\varepsilon}_{\text{п}}$  от времени  $t$  при данном нагружении.

Зависимость повреждаемости  $\omega(t)$ , согласно формуле (9), при «жестком» нагружении образцов, имеющих диаграмму деформирования без площадки текучести, представлена на рис. 7, г. В случае диаграммы деформирования с площадкой текучести (рис. 7, д), график повреждаемости имеет «перегиб» (рис. 7, е). Как правило, повреждаемость, аналогично пластической деформации, накапливается с различными скоростями на протяжении всего процесса испытания.



- 1 – стадия упругой деформации – до 0,2%.
- 2 – стадия микротекучести – 0,2–0,4%.
- 3 – стадия текучести – 0,4–2%.
- 4 – стадия деформационного упрочнения.
- 5 – период распространения трещин до полного разрушения материала

Зависимости полной  $\epsilon$ , упругой  $\epsilon_y$  и пластической деформаций  $\epsilon_p$  от времени  $t$  при «жестком» нагружении растяжением

Зависимости скоростей полной  $\dot{\epsilon}$ , упругой  $\dot{\epsilon}_y$  и пластической деформаций  $\dot{\epsilon}_p$  от времени  $t$  при «жестком» нагружении растяжением материала, имеющего гладкую диаграмму деформирования

Зависимость повреждаемости  $\omega(t)$  от времени  $t$  при «жестком» нагружении растяжением материала (без площадки текучести)

Зависимость напряжения  $\sigma$  от времени  $t$  при наличии у диаграммы деформирования площадки текучести

Повреждаемость материала  $\omega$  для диаграммы деформирования с площадкой текучести

Рис. 7. Схематичное представление стадий развития деформации и повреждаемости  $\omega$  при «жестком» статическом нагружении

На рис. 8, а представлена диаграмма деформирования растяжением с заданной скоростью  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  образца, вырезанного поперек линии прокатки из листа алюминиевого сплава 1163-АТВ. Размеры образца: толщина 1,5 мм, ширина 20 мм, длина

рабочей базы 70 мм. Такой же образец подвергли, с аналогичной скоростью, повторно-статическому «жесткому» нагружению пилообразным циклом с постоянным малым (0,01%) шагом увеличения деформации с каждым последующим циклом по графику, представленному на рис. 8, б. Шаг по деформации в 0,01% легко реализовали в упругой области (стадия I) – петля «нагрузка–разгрузка» в координатах  $\sigma$ – $\epsilon$  (рис. 9) на стадиях I и II замкнута. При первом появлении пластической деформации на последнем деформационном шаге (при этом остальная часть диаграммы имеет линейный упругий вид) программа испытания (на стадии разгрузки) не допускала появления сжимающих напряжений и обеспечивала деформацию в цикле, равную появившейся остаточной деформации. Необходимо исключить сжимающие напряжения для избежания потери устойчивости образца при росте остаточной деформации. Таким образом, получали незамкнутую первую петлю «нагрузка–разгрузка» в координатах  $\sigma$ – $\epsilon$ . Типичный вид незамкнутых петель на стадиях III, IV и V представлен на рис. 9. После незамкнутой петли, в зависимости от вида ее пика и ширины, снова реализуются замкнутые упругие петли, пока величина упругой деформации не достигнет снова на последнем деформационном шаге значения для реализации пластической деформации.

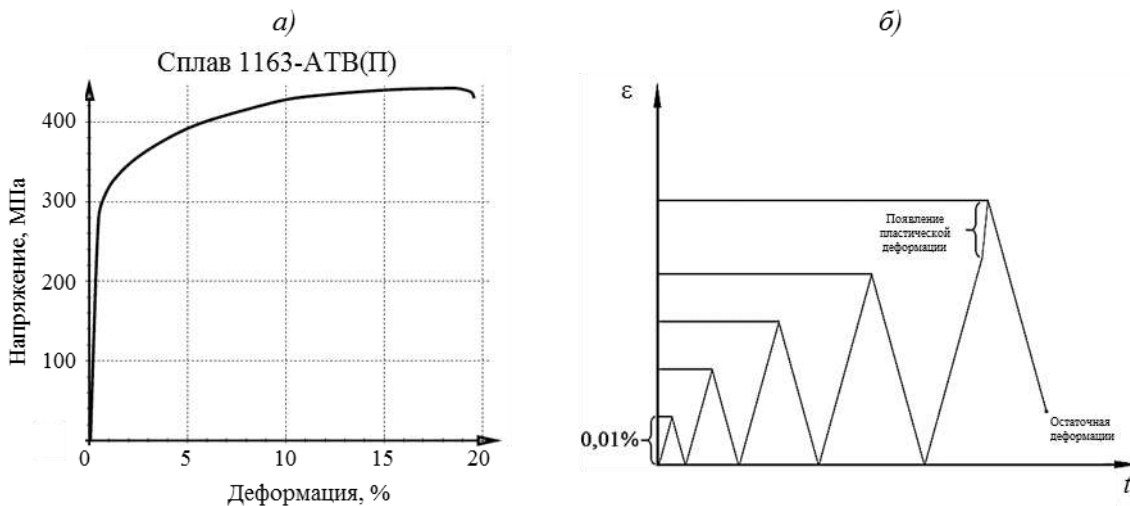


Рис. 8. Диаграмма деформирования (а) и график повторно-статического нагружения пилообразным циклом с постоянным шагом по деформации в 0,01% в упругой области с первым появлением пластической деформации (б)

Кинетика повреждаемости материала образца как функция остаточной деформации проявлялась в росте повреждаемости с увеличением величины остаточной деформации за цикл. Представленные на рис. 9 петли в координатах  $\sigma$ – $\epsilon$ , характерные для каждой из пяти стадий деформации, показывают наличие двух видов петель (замкнутая петля – при упругой деформации и незамкнутая петля – при появлении пластической деформации). Форма незамкнутой петли в виде полосы с размером по оси деформации, равным остаточной деформации за цикл, практически не изменяется при росте в образце пластической деформации. С ростом упругой и пластической деформаций и напряжения увеличиваются остаточная деформация за цикл и площадь петли.

Аналогичные испытания проведены с использованием плоских образцов толщиной от 1,0 до 1,5 мм, шириной 20 мм, рабочей базой 70 мм из листов алюминиево-литиевых сплавов В-1481-Т1 и 1441-Т1.

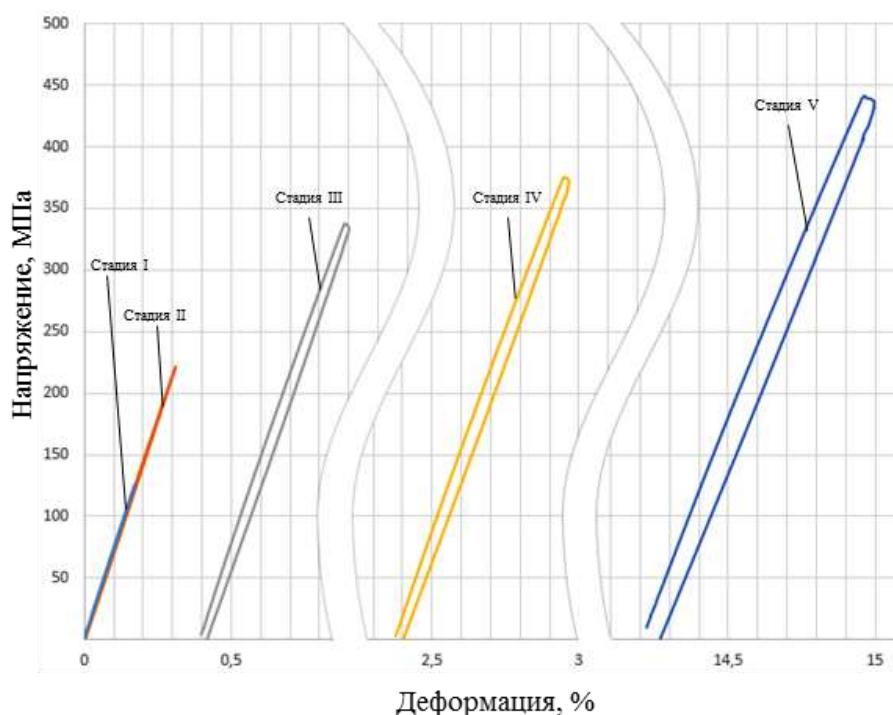


Рис. 9. Виды петель, характерные для каждой из пяти стадий деформации

Огибающие линии диаграмм повторно-статического нагружения с постоянным шагом увеличения деформации с каждым последующим циклом (рис. 10) близки к диаграммам обычного растяжения, но показали наличие эффекта, при котором пластическая деформация реализуется дискретно при напряжениях, не превышающих определенный постоянный уровень. Этот эффект – подобие площадки текучести при растяжении. Однако на исходных диаграммах растяжения такие площадки отсутствуют. Данный эффект наблюдается для сплавов 1441-T1 и 1163-ATB. Для сплава В-1481-T1 такой эффект не выявлен.

В таблице представлены напряжения при повторно-статическом нагружении и диапазон деформаций, при котором проявляется описанный эффект для сплавов 1441-T1 и 1163-ATB.

**Диапазон деформаций для эффекта с постоянным уровнем напряжений, при котором реализуется пластическая деформация**

| Сплав (полуфабрикат)       | Направление вырезки образцов* | Напряжение, МПа   | Диапазон деформации, % |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| В-1481-T1<br>(лист 1,5 мм) | Д                             | Эффект не выявлен |                        |
|                            | П                             |                   |                        |
| 1441-T1<br>(лист 1,0 мм)   | Д                             | 385               | 1,6–2,4                |
|                            | П                             | 415               | 1,7–2,5                |
| 1163-ATB<br>(лист 1,2 мм)  | Д                             | 410               | 2,4–3,5                |
|                            | П                             | 375               | 2,4–3,5                |

\* Д – вдоль линии прокатки; П – поперек линии прокатки.

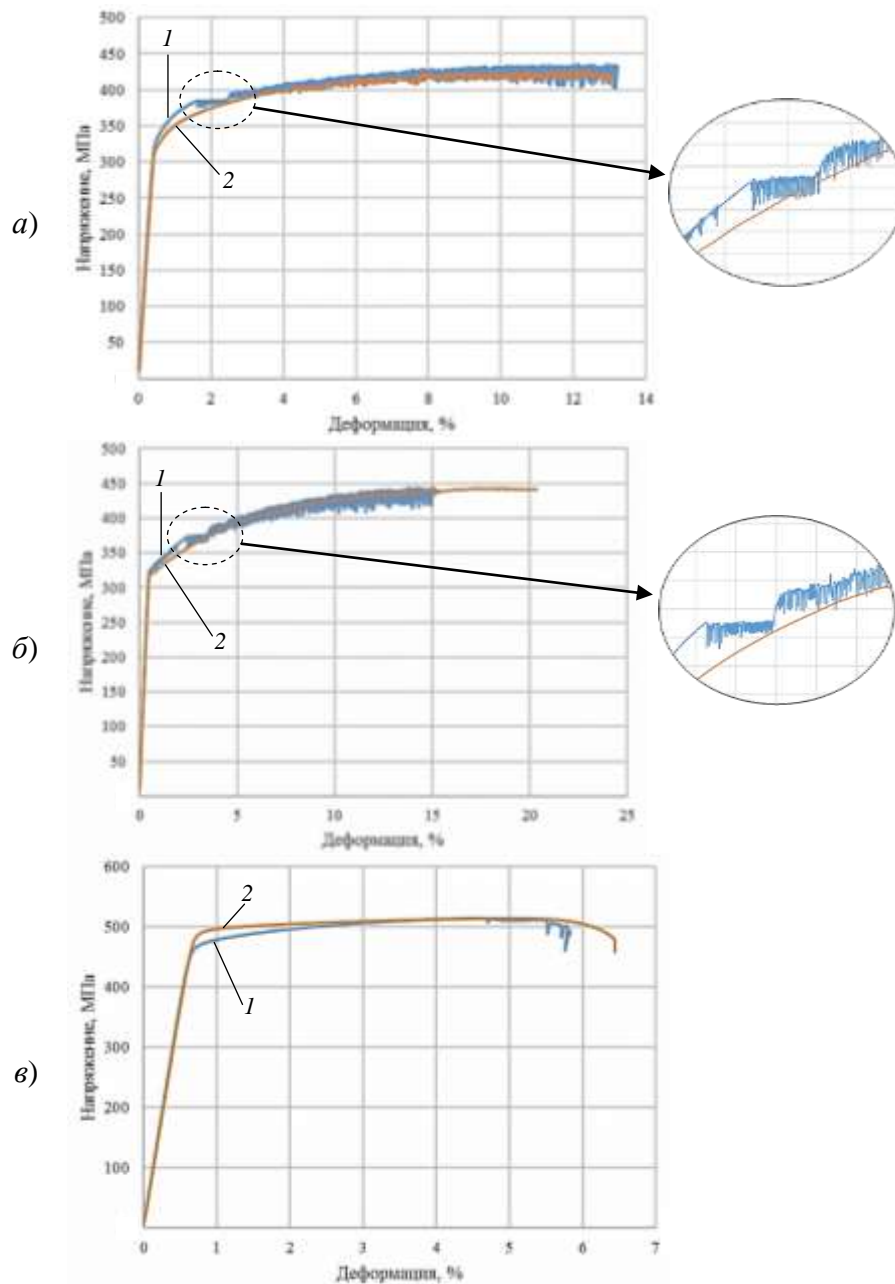


Рис. 10. Огибающие линии диаграмм повторно-статического нагружения (1) вместе с диаграммами деформирования (2) для сплавов 1441-T1 (а), 1163-ATB (б) и B-1481-T1 (в)

### Заключения

Современные испытательные машины с высокой жесткостью силовой цепочки «образец–испытательная машина», возможностью проведения испытания при контроле скорости деформирования рабочей базы образца с помощью точного и чувствительного датчика деформации, закрепленного на рабочей базе образца, позволяют качественно реализовать «жесткое» нагружение, при котором задается скорость развития полной деформации образца, а регистрируется соответствующее данной деформации напряжение.

Основным преимуществом «жесткого» нагружения перед «мягким» нагружением является возможность получения диаграмм деформирования при большой скорости

протекания пластической деформации в образце, когда напряжение остается постоянным или даже падает (эффект Портвена–Ле-Шателье).

Кроме того, «жесткое» нагружение позволяет перейти от 2D-системы регистрации результатов испытаний (на плоскости  $\sigma$ – $\varepsilon$ ) к 3D-системе с координатами  $\sigma$ – $\varepsilon$ – $t$ , а также определять (в дополнение к традиционным механическим характеристикам) следующие характеристики: скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_p$ , повреждаемость материала образца  $\omega$  и скорость повреждаемости материала  $\nu$ . В качестве основных параметров, формирующих данные функции, предложены величина пластической деформации  $\varepsilon_p$  и время испытания  $t$ . Определяемая при малых скоростях «жесткого» деформирования скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}_p$ , по условиям роста деформации, может быть соотнесена со скоростью установившейся быстроскоростной ползучести (секундной, минутной или часовой).

Предлагается для изучения процесса накопления пластической деформации и повреждаемости материалов использовать комбинацию из статического жесткого нагружения и повторно-статического жесткого нагружения с постоянным малым ( $\sim 0,01\%$ ) шагом увеличения деформации с каждым последующим циклом, при этом оба вида нагружения следует реализовать с одной и той же скоростью деформирования.

Показано, что огибающие линии диаграмм повторно-статического нагружения могут иметь площадку, на которой пластическая деформация реализуется дискретно при напряжениях, не превышающих определенный постоянный уровень (подобие площадки текучести при растяжении).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.А., Ламашевский В.П., Музыка Н.Р., Швец В.П., Якименко Е.В. Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях // Проблемы прочности. 2011. №5. С. 32–44.
2. Махутов Н.А., Москвитин Г.В. Влияние условий нагружения на накопление повреждений и разрушение // Машиностроение: энциклопедия. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-I: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. С. 220–221.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
4. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
5. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве  $\sigma$ – $\varepsilon$ – $t$  // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
6. 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.
7. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
8. Ерасов В.С. Деформация, напряжение, время при испытаниях на растяжение // Труды ЦАГИ. 2015. №2751. С. 107–115.
9. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Повреждаемость материалов при статическом растяжении // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 91–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-91-94.

10. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. 2015. №3. С. 42–47.
11. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2018).
12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. MMPDS-02. Metallic Materials Properties Development and Standardization. Atlantic City: Federal Aviation Administration, 2005. P. 1–36.
14. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91.
15. Горев Б.В., Банщикова И.А. К описанию ниспадающего участка кривой деформирования «напряжение–деформация» по кинетическим уравнениям со скалярным параметром повреждаемости // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. 2008. №2 (17). С. 110–117.
16. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. С. 37–44.
17. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.