

УДК 620.172.254

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹, А.Н. Луценко¹

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-91-94

Современное проектирование по принципу «безопасного повреждения» допускает появление и развитие в конструкции повреждения не критических размеров, которое во время эксплуатации должно быть обнаружено, а конструкция отремонтирована. Поэтому регистрация процесса повреждения является важной практической задачей. В работе представлен процесс повреждаемости образца из металлического материала при его статическом растяжении и описывающая этот процесс функция повреждаемости ω , которая изменяется от 0 (исходное состояние образца) до 1 – для разрушенного или исчерпанного деформационный ресурс образца. Получены графики повреждаемости. Предложено опасность разрушения оценивать двумя функциями: повреждаемости и скорости повреждаемости. В качестве основных параметров, формирующих данные функции, предложены продолжительность и величина пластической деформации.

Ключевые слова: принцип «безопасного повреждения», испытание, статическое растяжение, продолжительность, упругая деформация, пластическая деформация, критическое значение пластической деформации, повреждаемость, скорость повреждаемости.

Modern design on the principle of «safe damage» allows emergence and development in construction of the damage is not critical size, which during exploitation must be detected, and the design is repaired. Therefore, the registration process damage is an important practical task. The paper presents the process of damage to the sample from the metal material in static tensile and describing this process function damaging ω . Function damage ω varies from 0 - initial state of the sample, up to 1 destroyed or depleted deformation resource sample. The obtained graphs damage. The proposed danger of destruction to evaluate two functions: a function of damage and function speed damageability. As the main parameters that shape these features, the proposed timing and size of the plastic deformation.

Keywords: the principle of «safe injury» test, static stretching, time, elastic deformation, plastic deformation, the critical value of plastic deformation, damage, speed damageability.

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

Разрушения и отказы при работе конструкций возникают, как правило, вследствие накопления повреждений при эксплуатации. Расчетные методы по определению работоспособности конструкций разрабатывают с учетом результатов большого количества испытаний образцов из материалов конструкций, наиболее распространенными из которых являются испытания на статическое растяжение [1, 2]. Результат испытания на статическое растяжение – диаграмма деформирования образца – дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и пластической областях. В работах [3, 4] рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение образцов материалов: деформации ε , напряжения σ и продолжительности t . Представлены преимущества процессов испытаний и их результатов в 3D-системе осей – σ – ε – t . Введение координаты t дает наглядное представление о том, что ни силовой, ни энер-

гетический, ни деформационный критерии не исключают повреждаемость образца, и со временем образец, накапливая повреждения, может разрушиться. Деформационный критерий (при возможности измерения в наиболее нагруженных местах локальной деформации) теоретически безопаснее силового и энергетического критериев. Современное проектирование по принципу «безопасного повреждения» создает конструкцию такой, что во время ее эксплуатации допустимо появление и развитие повреждения не критических размеров, которое в результате периодических проверок должно быть обнаружено, после чего конструкция должна быть отремонтирована. Поэтому регистрация процесса повреждения является важной практической задачей [5–10].

Материалы и методы

В данной работе описан процесс повреждаемости образца из металлического материала при испытании на статическое растяжение. Историче-

ски 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, т. е. «жесткое» нагружение, когда задают деформацию образца, а регистрируют 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. Однако такая характеристика испытания, как скорость протекания пластической деформации не определялась при проведении испытаний на кратковременное растяжение.

В работе [4] показано, что при испытаниях на статическое растяжение образцов металлических материалов при «жестком» режиме нагружения (управление скоростью деформирования образца с помощью экстензометра, закрепленного на рабочей базе образца) можно регистрировать скорость развития пластической деформации на рабочей базе образца.

Механизм накопления повреждений во многом схож для различных видов прикладываемой нагрузки (кратковременной и длительной статической, переменной): внутризеренная неоднородность порождает неоднородность локальной деформации на микроуровне, в результате происходит образование микротрещин, которые развиваются в макротрещину и приводят к разрушению материала [11]. Рост микротрещин и макротрещины также сопровождается пластической деформацией в их вершинах. Из этого следует – величина пластической деформации и скорость ее протекания могут служить мерой повреждаемости [12].

Деформация – сложный процесс, она развивается по стадиям [13, 14]. Сначала реализуются механизмы с низкой энергией активации (упругая деформация), затем – с более высокой (пластическая деформация). Разные виды пластической деформации протекают с различными скоростями [4, 14]. В сложных системах возможно также двойственное поведение, т. е. бифуркация [15], но, как отмечено в работе [13], стадии деформации одни и те же при разных видах испытаний, и при испытании на растяжение можно выделить стадии деформации, показанные на рисунке:

1 – упругая деформация – выполняется закон Гука, упругая деформация преобладает над остальными видами деформации на участке до $\varepsilon = 0,2\%$, далее упругая деформация медленно растет с увеличением напряжения до σ_b , а затем снижается;

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, неомогенная 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.

На рисунке цифрой 5 обозначен период распространения трещин – от начала шейкообразования до полного разрушения материала.

Результаты

В диапазоне напряжений $0 \leq \sigma \leq \sigma_{\max}$ для моделирования диаграммы деформирования широко используется формула Ремберга–Осгуда [16], описывающая зависимость полной деформации ($\varepsilon_{\text{пол}}$) от напряжения (σ):

$$\varepsilon_{\text{пол}} = \varepsilon_y + \varepsilon_{\text{пл}} = A\sigma + B\sigma^n, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{пол}}$ – полная деформация; ε_y – упругая деформация; $\varepsilon_{\text{пл}}$ – 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.

Формула Ремберга–Осгуда позволяет предположить, что упругая деформация ε_y и константа $A = 1/E$ отвечают за силовую несущую способность образца, а величина пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}}$ – за его повреждаемость. Тогда в качестве функции повреждаемости образца (ω) можно использовать скалярную величину, изменяющуюся от 0 (исходное состояние образца) до 1 – для разрушенного или исчерпавшего деформационный ресурс образца [12]. Аргументом является продолжительность протекания процесса испытания t в условиях жесткого нагружения

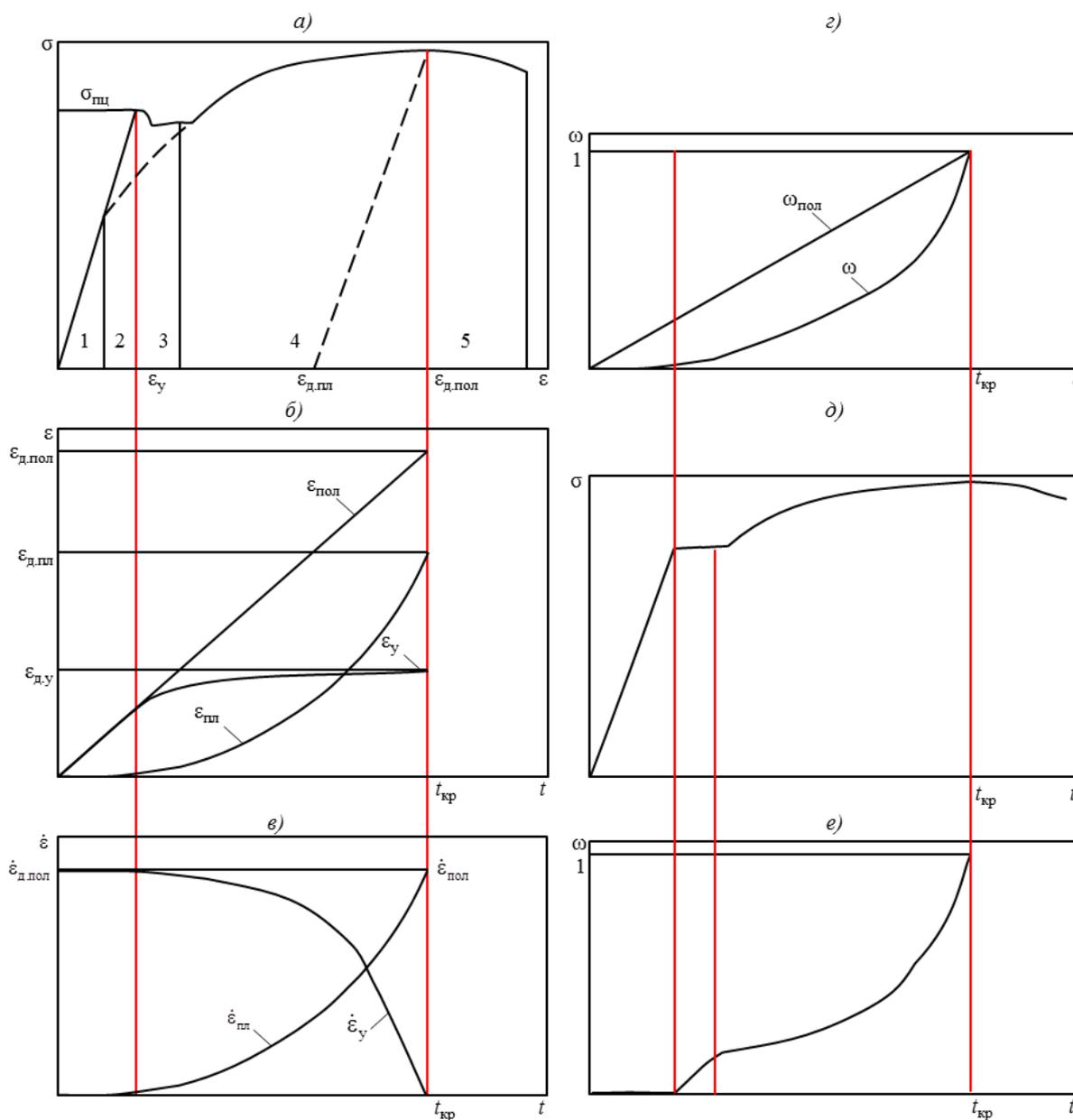
$$0 \leq \omega(t) \leq 1. \quad (3)$$

Такой подход вызывает необходимость выбора критического значения относительной пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}}$ для того, чтобы можно было получать текущее значение $\omega(t)$ путем деления текущего значения характеристики на ее критическое значение для реализации формулы (3).

Обозначим критическое значение относительной пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}} - \varepsilon_{\text{д.пл}}$, т. е. $\varepsilon_{\text{д.пл}}$ – допустимая величина пластической деформации при кратковременном растяжении. Определив $\varepsilon_{\text{д.пл}}$, можно получать текущее значение $\omega(t)$, соответствующее формуле (3), представив процесс повреждаемости в виде формулы:

$$\omega(t) = \frac{1}{\varepsilon_{\text{д.пл}}} \int_0^t \dot{\varepsilon}_{\text{пл}}(t) dt, \quad (4)$$

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



Стадии развития деформации и повреждаемости ω при жестком статическом растяжении:

- a* – стадии развития упругой деформации (1), микротекучести (2), текучести (3), деформационного упрочнения (4), период распространения трещин до полного разрушения материала (5);
- б* – зависимости полной ($\epsilon_{пол}$), упругой (ϵ_y) и пластической деформаций ($\epsilon_{пл}$) от продолжительности процесса (t) при «жестком» нагружении растяжением;
- в* – зависимости скорости полной ($\dot{\epsilon}_{д.пол}$), упругой ($\dot{\epsilon}_y$) и пластической деформаций ($\dot{\epsilon}_{пл}$) от продолжительности процесса (t) при «жестком» нагружении растяжением материала, имеющего гладкую диаграмму деформирования;
- г* – зависимости повреждаемости от продолжительности процесса (t) с учетом полной ($\omega_{пол}$) и пластической деформаций (ω) при «жестком» нагружении растяжением материала, имеющего гладкую диаграмму деформирования;
- д* – зависимость напряжения (σ) от продолжительности процесса (t) при наличии на диаграмме деформирования площадки текучести;
- е* – повреждаемость материала (ω) при наличии на диаграмме деформирования площадки текучести

Производная повреждаемости по продолжительности (скорость повреждаемости) в соответствии с уравнением (3) равна:

$$v(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_{д.пл}} \dot{\varepsilon}_{пл}(t). \quad (5)$$

Скорость повреждаемости, как и величина самой повреждаемости, может служить критерием для расчета ресурса конструкции (размерность получаемой величины – с⁻¹).

На рисунке показаны графики развития во времени полной ($\varepsilon_{пол}$), упругой ($\varepsilon_{у}$) и пластической ($\varepsilon_{пл}$) деформаций (см. рисунок, б), скоростей деформаций (см. рисунок, в). С учетом формулы (3) представлена повреждаемость при учете полной деформации $\omega_{пол}$ и только пластической деформации ω (см. рисунок, г). Для диаграмм деформирования с площадкой текучести (см. рисунок, д) график повреждаемости не гладкий, он имеет перегибы (см. рисунок, е).

Введение

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструктивных 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. №5. С. 440–448.
3. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и представлении результатов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №52. С. 62–67.
4. 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.
5. 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.
6. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
7. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
8. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
9. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости //Авиационные материалы и технологии. 2014. №54. С. 109–117.
10. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник 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.
11. Махутов Н.А., Москвитин Г.В. Влияние условий нагружения на накопление повреждений и разрушение /Машиностроение. Энциклопедия. Т. II-I. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. М.: Машиностроение. 2010. С. 220–221.
12. 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.
13. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. С. 37–44.
14. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.
15. Шанявский 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.
16. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-02), United States, Atlantic City: Federal Aviation Administration. 2005. P. 1–36.

Обсуждение и заключения

Вид кривых деформирования при «жестком» нагружении растяжением позволяет предположить, что упругая деформация характеризует силовую (несущую) способность образца материала, а величина пластической деформации – повреждаемость рабочего объема образца.

Производная повреждаемости по времени (скорость повреждаемости, определяемая скоростями протекания пластической деформации) может служить критерием для расчетов ресурса конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП «ВИАМ».