

УДК 620.1

Е.И. Орешко¹, В.С. Ерасов¹, А.Н. Луценко¹, В.Ф. Терентьев², А.К. Слизов³**ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ σ - ε - t**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68

Рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение: деформации, напряжения и времени. Показано преимущество представления процессов испытаний и их результатов в 3D-системе осей – напряжение, деформация и время.

Для построения трехмерных диаграмм деформирования материала предложена программа ANSYS Mechanical, позволяющая строить точную геометрическую форму объекта как с помощью удобного графического интерфейса пользователя, так и с помощью языка параметрического программирования APDL. Описана методика построения трехмерных диаграмм деформирования σ - ε - t .

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 3.1. «Компьютерное конструирование и моделирование композиций литейных и деформируемых сплавов и сталей, включая естественные композиты и интерметаллиды, процессов их изготовления и переработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

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

The paper focuses on the interplay of the main tensile test factors: strain, stress and time. The advantages of representation of testing processes and their results in 3D coordinate system (stress, strain and time) are demonstrated.

For creation of three-dimensional charts of deformation of material the ANSYS Mechanical program is proposed, allowing to build exact geometry of object, both by means of the convenient graphic interface of the user and parametric programming language APDL. Construction technique of 3D stress-strain diagrams is described.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 3.1. «Computer designing and modeling of compositions of cast and wrought alloys and steels, including natural composites and intermetallic compounds, technologies of their manufacturing and processing» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: mechanical tests, static stretching, time, elastic deformation, plastic deformation, soft loading, hard loading, strain rate, 3D coordinate system «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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук [Institute of Metallurgy and Materials Science A.A. Baykova of Russian academy of sciences]; e-mail: imet@imet.ac.ru

³Акционерное общество «Камов» [Joint Stock Company «Kamov»]; e-mail: ir@rus-helicopters.com

Введение

В настоящее время наиболее распространенным и информативным способом определения механических свойств материалов являются испытания на статическое растяжение, с помощью которых определяются основные механические свойства материала [1–8]. Результатом испытания на статическое растяжение является диаграмма деформирования, которая дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и пластической областях.

Механическое испытание проходит в трехмерной системе σ - ε - t . Испытание на растяжение и

регистрация результатов проходят только на 1/8 части этого пространства, ограниченного плоскостями σ - ε , ε - t и σ - t . Диаграмма в плоскости σ - ε является проекцией диаграммы σ - ε - t из трехмерной системы в 2D-систему. Две другие плоскости σ - t и ε - t соответственно плоскости «мягкого» и «жесткого» нагружения, где происходит управление нагружением при испытании.

«Мягкое» нагружение – метод, в котором контрольным параметром испытания является нагрузка (напряжение).

«Жесткое» нагружение – метод, в котором контрольным параметром испытания является

деформация. Основное преимущество «жесткого» нагружения – 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.

В случае управления испытанием в «жестком» режиме – испытание регистрируют в плоскости $\sigma-\xi$ (рис. 1), где ось ξ – линия пересечения этой плоскости с плоскостью $\varepsilon-t$.

Величина ξ выражается через ε , t и $\dot{\varepsilon}$:

$$\xi = \sqrt{\varepsilon^2 + (bt)^2} = t\sqrt{\dot{\varepsilon}^2 + b^2}, \quad (1)$$

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

Скорость деформирования образца на рабочей длине $\dot{\varepsilon} = tg\varphi$, где φ – угол между плоскостями $\sigma-\xi$ и $\sigma-t$. Чем меньше угол φ , тем больше напряжение зависит от фактора времени, тем ближе плоскость $\sigma-\xi$ к плоскости $\sigma-t$ и тем ближе «жесткое» нагружение к «мягкому».

Статические испытания можно рассматривать как серию равновесных состояний, возникающих со скоростями – от 10^{-11} до $10^{-3} c^{-1}$. При проведении многих стандартных механических испытаний фактор скорости (или времени) часто вообще не учитывается и не регламентируется. Но ско-

рость деформирования важный параметр нагружения, который влияет на многие эффекты, проявляющиеся в материале при его испытании.

Так, с увеличением скорости деформации возрастает величина верхнего и нижнего предела текучести. При механических испытаниях также может проявляться эффект деформационного старения – при высокой скорости деформирования деформация будет происходить при более низком напряжении. Это является причиной зависимости кривой «напряжение–деформация» для мягкой стали от скорости деформации (рис. 2). Наблюдается обратная зависимость напряжения от скорости истинной деформации [9].

В. Сильвестрович и Е.О. Холл обнаружили, что наибольший зуб текучести возникает при наименьшей скорости деформации.

Часто оказывается, что участок текучести на кривой «напряжение–деформация» не является гладким, а на нем наблюдаются скачки, которые впервые обнаружили авторы статьи [10] при исследовании дюралюмина, а вскоре этот же эффект обнаружили при исследовании каменной соли [11]. В пластической области, когда кристалл деформируется при действии постоянного напряжения, неустановившаяся ползучесть также протекает скачкообразно. В работе [12] это явление объяснено взаимодействием примесей или вакансий с дислокациями. Этот эффект наблюдается при увеличении скорости деформирования материала (рис. 3).

Таким образом, фактор скорости (или времени) необходимо учитывать при проведении

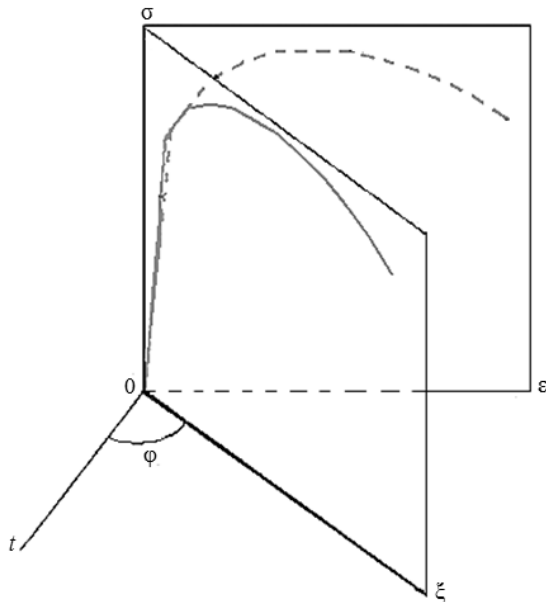


Рис. 1. Представление диаграммы деформирования в трехмерной системе координат и ее проекция на 2D-систему

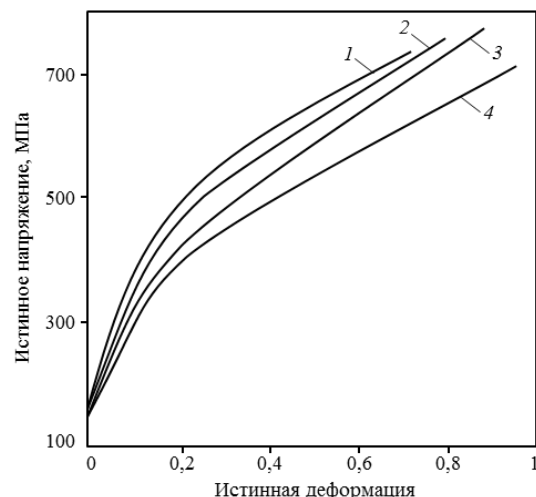


Рис. 2. Кривые «истинное напряжение–истинная деформация» для отожженной стали марки SAE1020 при постоянных скоростях деформирования $5 \cdot 10^{-5}$ (1); $20 \cdot 10^{-5}$ (2); $100 \cdot 10^{-5}$ (3) и $500 \cdot 10^{-5} c^{-1}$ (4) [9]

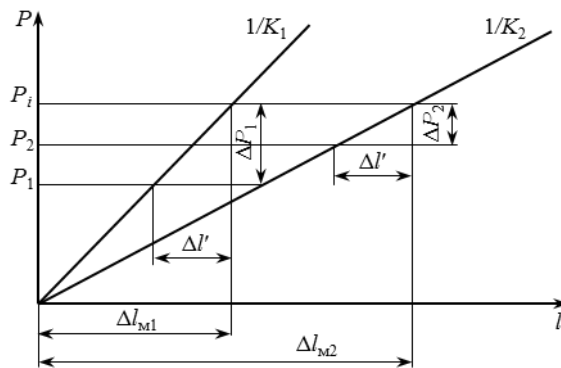


Рис. 3. Схема оценки жесткости испытательной машины (Δl_m – абсолютная упругая деформация машины; K – податливость; P – приложенная сила)

испытаний – целесообразно строить диаграмму деформирования материала в трехмерной системе σ – ϵ – t , позволяющей наблюдать изменение механических свойств материала в зависимости от скорости деформирования и наглядно представлять процессы, происходящие при этом.

Материалы и методы

Методику испытания на растяжение в настоящее время определяют международные стандарты EN ISO 6892-1 Metallic Materials – Tensile Testing, ASTM E8-08 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Скорости испытания могут быть выбраны по методу А или методу В. По методу А проводят контроль скорости испытания по экстензометру, закрепленному на рабочей части образца. По методу В удлинение образца принимают равным перемещению подвижного захвата. Но величина удлинения должна определяться только на расчетной длине образца. Перемещение же захвата соответствует суммарному удлинению, включающему деформацию зажимов машины, а также упругие деформации других ее частей. Величина всех этих «паразитных» деформаций определяет жесткость испытательной машины.

Жесткость испытательной машины определяется как величина, обратная податливости K , равной перемещению подвижного захвата на единицу приложенной силы P . Перемещение подвижного захвата Δl_m включает суммарную упругую деформацию нагруженных частей машины [13]. Таким образом, жесткость машины равна, МН/м:

$$\frac{1}{K} = \frac{P}{\Delta l_m} \tag{2}$$

Чем больше жесткость, тем меньше упругая деформация частей машины при заданной нагрузке. Абсолютно жестких машин не бывает. Величина $1/K$ в современных испытательных машинах колеблется – от десятков до сотен МН/м. Зависит она в основном от упругих деформаций в силоизмерительном механизме, которые вносят основной вклад в величину Δl_m (деформации станины,

захватов и других частей машины обычно незначительны).

Машины с разной жесткостью будут характеризоваться разным наклоном прямых на диаграмме «нагрузка–абсолютная упругая деформация машины» (рис. 3). Чем больше наклонена прямая относительно оси деформаций, тем жестче машина. При одном и том же усилии P в более податливой машине возникнет упругая деформация Δl_{M2} , превышающая такую деформацию Δl_{M1} в более жесткой машине. Соответственно в податливой машине будет накапливаться большая упругая энергия:

$$A_{упр} = P \Delta l_{M2} / 2 > P \Delta l_{M1} / 2. \tag{3}$$

В случае разгрузки, например при образовании зуба текучести при разрушении, эта запасенная упругая энергия будет неизбежно выделяться. Если в результате разгрузки упругая деформация двух сравниваемых машин уменьшится на одинаковую величину $\Delta l'$ (рис. 3), то нагрузка в жесткой машине снизится сильнее, чем в податливой (на ΔP_2), и в последней сохранится большая упругая энергия.

В обоих случаях выделение $A_{упр}$ приведет к увеличению скорости деформации и действующего на образец усилия, поскольку при разгрузке неподвижный захват будет быстро – со скоростью упругой деформации – перемещаться на величину $\Delta l'$. Степень влияния жесткости машины на результаты испытаний зависит от свойств материала образца, который тоже обладает жесткостью

$$\frac{1}{K_{обр}} = \frac{P}{\Delta l_{обр}} \tag{4}$$

Для замкнутой системы «машина–образец» определяют коэффициент податливости, который тем больше, чем меньше жесткость машины по сравнению с жесткостью образца:

$$q = (1/K_{обр}) / (1/K) = \Delta l_m / \Delta l_{обр} \tag{5}$$

Если $1/K_{обр} > 1/K$, то $q > 1$, и запасенная машиной упругая энергия будет при разгрузке передаваться образцу, в результате чего фиксируемое силовым измерителем усилие окажется завышенным. Если образец податливее машины ($1/K_{обр} < 1/K$ и $q < 1$), то это завышение будет меньше. Следовательно, чем жестче машина, тем точнее будут измеряться усилия при быстрых изменениях их величин в процессе испытания. При плавном нагружении в областях упругой и равномерной пластической деформации влияние жесткости машины на механические свойства несущественно.

Величина «паразитных» деформаций частей машины тем больше, чем выше сопротивление образца растяжению. Полностью избавиться от них невозможно. Поэтому предпочтение следует отдать методу А как более современному, обеспечивающему более точные условия испытания по сравнению с методом В, так как для регистрации только удлинения расчетной части образца на ней размещают экстензометр.

Рассмотрим диаграмму деформирования при растяжении в координатах σ – ϵ цилиндрических образцов из сплава марки В-1461 системы Al–Cu–Li [14, 15] при скоростях деформирования от 10^{-6} до 10^{-1} c^{-1} (рис. 4), полученных по методу А. Скорости деформирования контролировали с помощью экстензометра, закрепленного на рабочей

длине образца. Эскиз образца для испытаний на статическое растяжение и его геометрические параметры представлены на рис. 5.

Для построения трехмерных диаграмм деформирования материала предложена программа ANSYS Mechanical, позволяющая строить точную геометрическую форму объекта как с помощью удобного графического интерфейса пользователя, так и с помощью языка параметрического программирования APDL [16–21].

Результаты

Для построения диаграмм деформирования определили координаты x и y (ϵ , σ) ключевых точек из представленного на рис. 6 графика.

В программе ANSYS 2D построили диаграммы с помощью ввода координат ключевых точек набором текстовых команд через командную строку.

Команда состоит из имени и списка параметров. Имя команды указывается первым, далее следуют параметры, разделенные запятыми. Например, команда создания ключевой точки может выглядеть следующим образом: K,1,10,10,10. В данном случае имя команды – K. Ее параметрами является последовательность чисел 1,10,10,10, которая означает, что создается ключевая точка с номером 1 и координатами x , y , z (10,10,10).

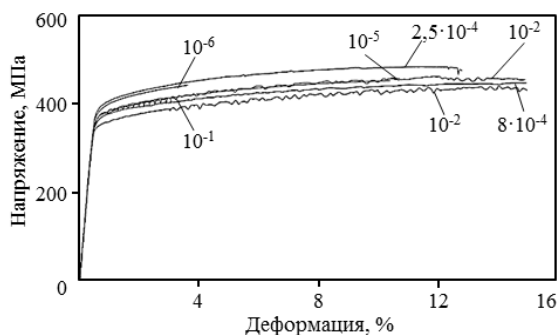


Рис. 4. Диаграммы деформирования образцов из сплава марки В-1461 системы Al–Cu–Li при скоростях деформирования от 10^{-6} до 10^{-1} c^{-1}

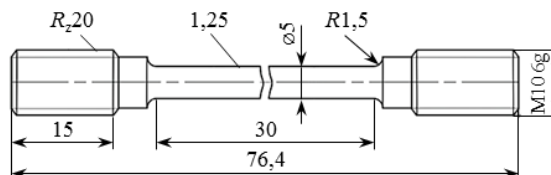


Рис. 5. Эскиз образца для испытаний на статическое растяжение

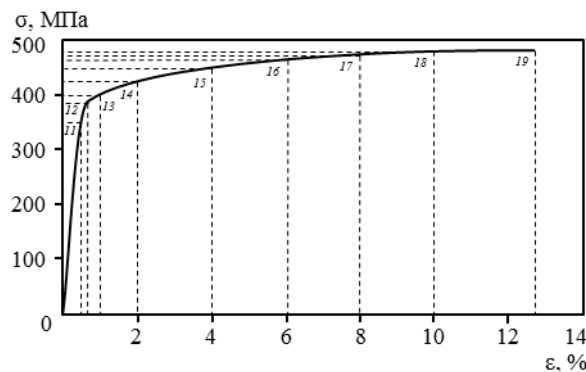


Рис. 6. Ключевые точки 11–19 для построения диаграммы со скоростью деформирования $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$

Некоторые аргументы команд могут отсутствовать, в таких случаях в команде значение аргумента не указывается, а ставится подряд две запятые – например $K,,10,10,10$. В данном случае создается ключевая точка, номер которой задается самой программой, а не пользователем.

Построим координатные оси, создав четыре ключевые точки, введя в командную строку следующие команды:

- 1 – $K,1,0,0,0$ – начало системы координат;
- 2 – $K,2,10,0,0$ – точка для задания оси x ;
- 3 – $K,3,0,10,0$ – точка для задания оси y ;
- 4 – $K,4,0,0,10$ – точка для задания оси z .

Каждый компонент модели ANSYS – будь то элемент, узел, объем, поверхность, линия или точка – имеет свой номер. Номера компонентов модели могут быть отображены на экране главного меню. При выборе того или иного компонента при задании команды бывает удобнее использовать его номер вместо того, чтобы указывать его на экране с помощью «мыши». Поэтому вывод на экран номеров компонентов модели в некоторых случаях может облегчить работу с программой.

Для удобства построения диаграмм выведем на экран номера точек, используя команду /PNUM или с помощью меню утилит Utility Menu>PlotCtrls>Numbering (в выпадающем диалоговом окне следует выбрать параметр KP).

Во фронтальной плоскости построенные ключевые точки 1 и 4 сливаются в одну. Используем вид в изометрии, чтобы увидеть расположение точек в трехмерном пространстве. Для управления видом и положением модели используем диалоговое окно Pan Zoom Rotate (Utility Menu>PlotCtrls>Pan Zoom Rotate), в котором содержится набор стандартных видов, где кнопка Iso соответствует изометрическому виду. Для самостоятельного вращения модели необходимо использовать Dynamic Mode.

После построения точек с помощью графического интерфейса соединим прямой линией начало системы координат с построенными точками, соответствующими трем перпендикулярным осям x, y, z (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>In Active Coord [Выбрать точки]>OK).

Далее аналогично построим точки 11–19, соответствующие диаграмме деформирования материала со скоростью $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. После построения точек диаграммы с помощью графического интерфейса соединим прямой линией начало системы координат с первой ключевой точкой, соответствующей пределу упругости материала. Следующие точки соединим сплайном (Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>With Options>Spline thru KPs [Выбрать «мышью» ключевые точки]>OK), получив диаграмму деформирования в координатах x, y (ϵ, σ).

Для построения трехмерных диаграмм определим для одной из ключевых точек 2D-диаграммы соответствующую ей координату времени по формуле:

$$t = \epsilon / \dot{\epsilon}, \quad (6)$$

где ϵ – абсолютная деформация; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования.

Для точки 19 координата $t=0,127/2,5 \cdot 10^{-4}=508$.

Для трехмерной диаграммы построим точку 20 с координатами x, y, z (ϵ, σ, t): 1,27; 4,75; 0,51, соответствующую точке 19 на 2D-диаграмме (рис. 7).

Построенная ключевая точка под номером 20 находится в плоскости σ – ξ , которая при пересечении с плоскостью ϵ – t образует ось ξ . Поэтому для построения оси ξ построим две плоскости ϵ – t и σ – ξ . Плоскость ϵ – t построим вытягиванием оси ϵ вдоль оси t (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>Along Lines). Далее проведем нормаль от точки 20 на ось ϵ (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>normal to Lane), которая разбивает ее на два отрезка (рис. 8). Вытянем отрезок 23–24 вдоль отрезка 23–20.

Ориентируем локальную систему координат по точкам 23–20–25 (Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Keypoints) так, чтобы ее секущая плоскость x – y совпадала с плоскостью σ – ξ , и разрежем ею плоскость ϵ – t . Удаляем все поверхности (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas Only) и лишние линии с принадлежащими им точками (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below), оставив только полученную ось ξ – отрезок 1–28 (рис. 9).

Вытянем кривую, соответствующую пластической деформации на 2D-диаграмме, вдоль оси t и разрежем полученную поверхность локальной системой координат, ориентированной в плоскости σ – ξ (рис. 10). Удалим полученные плоскости и принадлежавшие им линии, оставив кривую 11–25. Соединим точки 1 и 11, получив диаграмму деформирования в трехмерном пространстве (рис. 11).

Построив трехмерные диаграммы с другими скоростями деформирования, соединим их сплайном и по полученным линиям создадим поверхности (Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines), получив поверхность деформирования материала с характерной плоскостью упругости.

На рис. 12 демонстрируется поверхность σ – ϵ – t , когда на нее смотрят под разными углами. По полученным трехмерным диаграммам деформирования алюминиевого сплава можно анализировать механические свойства материала при разных скоростях деформирования.

Так, при высоких скоростях деформирования кривые имеют волны, характерные эффекту Портевейна–Ле-Шателье, а также деформирование проходит при более низких напряжениях – в сравнении с высокими скоростями, что характерно эффекту деформационного старения.

По данной методике можно строить трехмерные диаграммы деформирования для различных материалов, например, для стали ВНС-9-III с ярко выраженной площадкой текучести (рис. 13).

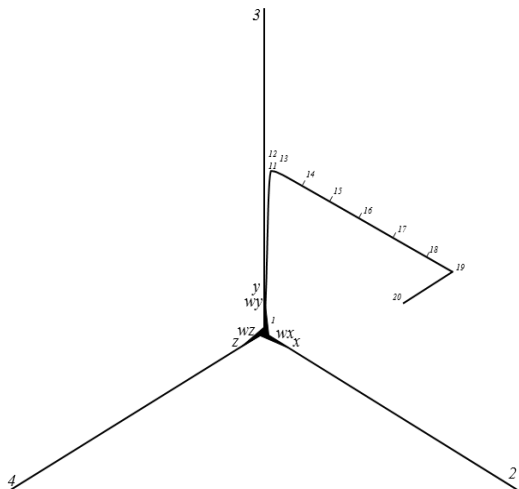


Рис. 7. Изометрический вид 2D-диаграммы в трехмерном пространстве

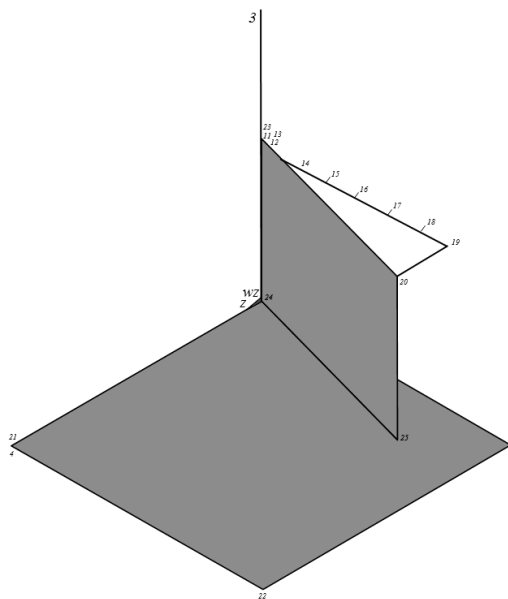


Рис. 8. Вид плоскостей σ - ξ и ϵ - t

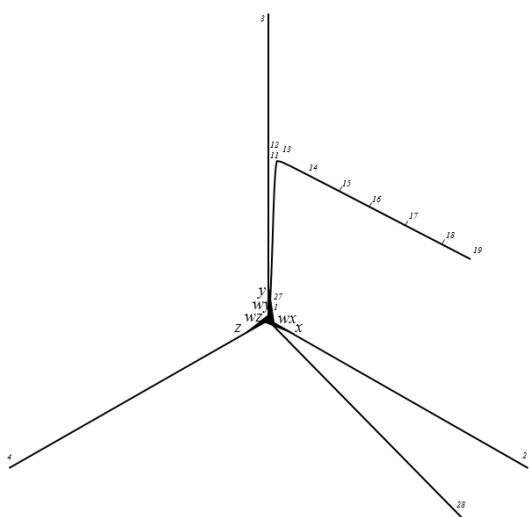


Рис. 9. Построение оси ξ

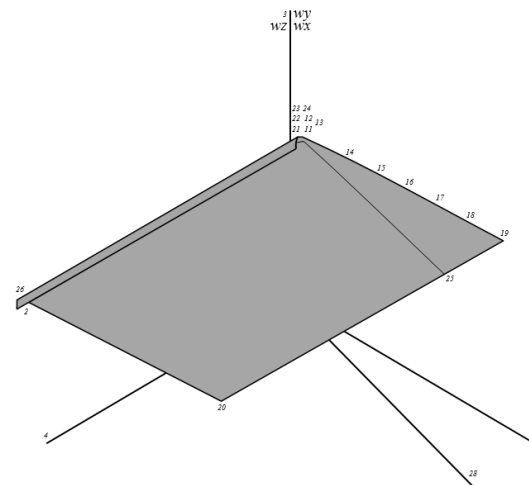


Рис. 10. Разбиение поверхности деформирования осью ξ

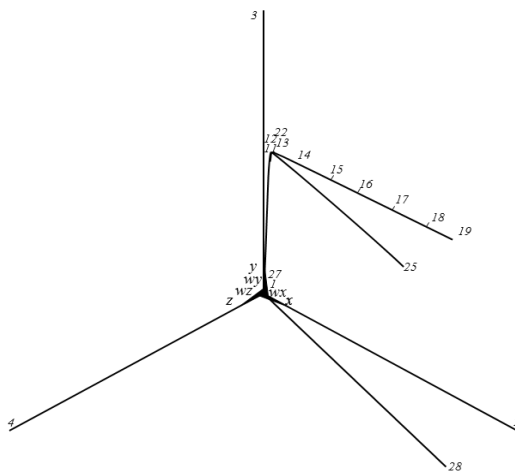


Рис. 11. Построение трехмерной диаграммы деформирования со скоростью $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$

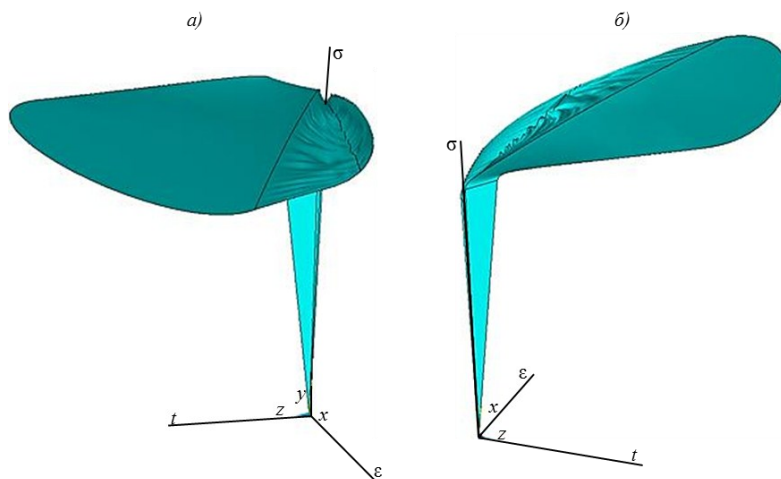


Рис. 12. Поверхность деформирования σ - ϵ - t для алюминиевого сплава:
 а – изометрический вид; б – вид слева

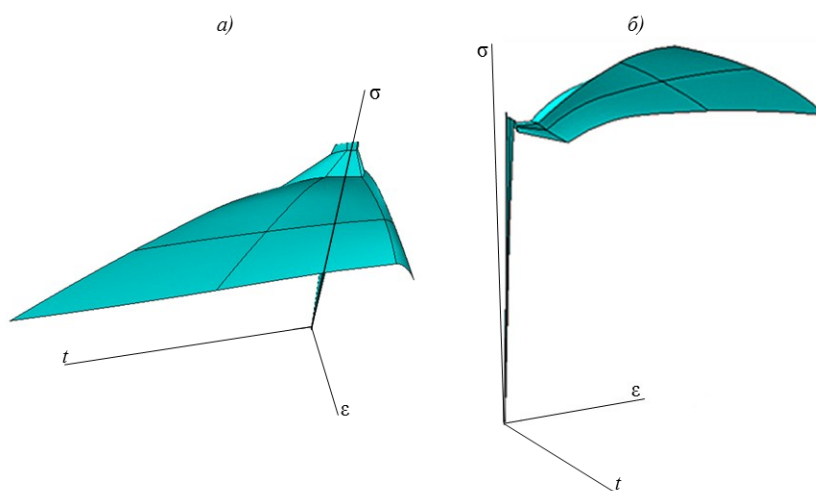


Рис. 13. Поверхность деформирования σ - ϵ - t для стали ВНС-9-III:
 а – изометрический вид; б – вид слева

Представление процесса испытания и его результатов в трехмерной системе осей «напряжение–деформация–время» визуализирует реальные процессы управления испытанием и регистрации его результатов, позволяет скомпоновать в пространстве большой объем информации о процессах испытания и регистрации результатов для удобства восприятия в процессе анализа результатов испытаний.

Обсуждение и заключения

В данной работе показано 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.

Рассмотрены методы выбора скорости испытаний. Выбран метод А и показаны его преимуще-

ства – обеспечение более точных условий испытания по сравнению с методом В, так как для регистрации только удлинения расчетной части образца на ней размещают экстензометр.

Обоснована целесообразность построения диаграмм деформирования материала в трехмерной системе σ - ϵ - t , позволяющей наблюдать изменение механических свойств материала в зависимости от скорости деформирования и наглядно представлять процессы, происходящие при испытании материалов. Разработана и описана методика построения трехмерных диаграмм деформирования σ - ϵ - t .

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».

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: метод. пособие. М.: ВИАМ, 2011. 16 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 163–165.
10. Portevin A., LeChatelier F. Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // *Acad. Sci. Compt. Rend.* 1923. Vol. 176. P. 507–510.
11. Классен-Неклюдова М.В. Дислокации и механические свойства кристаллов. М.: Изд-во. иностр. лит. 1960. 552 с.
12. Cottrell A.H. Vacancies and Other Point Defects in Metals and Alloys. London: Inst. Metals, 1958. P. 1–40.
13. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСиС, 1998. С. 157–159.
14. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Ключкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al–Cu–Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 66–70.
15. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Яковлев Н.О., Оглодков М.С. Алюминий-литиевый сплав В-1461 системы Al–Cu–Li для криогенных температур // *Металлургия машиностроения*. 2014. №5. С. 29–33.
16. 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. №S4. С. 109–117. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S4-109-117.
17. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 50–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
18. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стержней и пластин // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4. С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-74-79.
19. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Луценко А.Н., Орешко Е.И. Моделирование упругопластических характеристик монокристаллических интерметаллидных сплавов на основе микроструктурного численного анализа // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. №2. С. 3–22.
20. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Базылева О.А., Сборщиков С.В. Расчет механических характеристик жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе никеля методом многомасштабного моделирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 33–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-33-48.
21. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмокомпозитного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-53-61.