

УДК 66.017

Е.И. Орешко¹, В.С. Ерасов¹, В.Д. Крылов¹

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА, ИСПЫТАННОГО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯ

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-59-66

Показаны преимущества 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 практически любую точную геометрическую форму как с помощью удобного графического интерфейса пользователя, так и с помощью параметрического языка APDL.

Описана методика построения трехмерных диаграмм деформирования σ – ϵ – t на примере результатов испытаний органического стекла СО-120.

Ключевые слова: механические испытания, статическое растяжение, время, упругая деформация, пластическая деформация, «мягкое» нагружение, «жесткое» нагружение, скорость деформирования, 3D-система осей «напряжение, деформация, время», органическое стекло СО-120.

Е.И. Oreshko¹, V.S. Erasov¹, V.D. Krylov¹

CONSTRUCTION OF 3D STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR THE ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOR OF THE MATERIAL TESTED AT VARIOUS LOADING RATES

The advantages of representation of testing processes and their results in 3D coordinate system of axes (stress, strain and time) were demonstrated.

For construction of three-dimensional diagrams of deformation of a material the ANSYS Mechanical program, allowing to build practically any exact geometry form, both by means of the convenient graphic interface of the user, and by means of parametrical language APDL is offered.

Construction of stress-strain diagram in 3D space on an example of organic glass SO-120 is described.

Keywords: mechanical tests, static tension, time, elastic deformation, plastic deformation, «soft» loading, «hard» loading, rate of straining, 3D coordinate system of axes «stress, strain, time», organic glass SO-120.

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

Одним из преимуществ испытаний на растяжение является получение информации о механическом поведении материала на всех этапах его нагружения: упругом, пластическом, высокоэластичном, появлении и развитии разрушения [1–4]. В частности, к их преимуществам относится то, что при испытаниях на растяжение материалы, в том числе и пластичные, могут быть доведены до разрушения [5–10].

Результатом испытания на статическое растяжение является диаграмма деформирования, которая дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и пластической областях.

Сопротивление материалов высокоэластическому и пластическому деформированию заметно возрастает при увеличении скорости нагружения

[11–13]. Что касается характеристик пластичности, то результаты отдельных исследований зачастую противоречивы и единого мнения пока, по видимому, не существует [14, 15]. Разноречивы также количественные данные о степени зависимости механических свойств отдельных материалов от скорости деформации (данные по вязкости металлов). Подробно этот вопрос рассматривается в работе [16], в которой, в частности, показано, что результаты испытаний определяются реализуемым в эксперименте параметром испытания.

С увеличением скорости деформации возрастает величина верхнего и нижнего предела текучести. При механических испытаниях также может проявляться эффект деформационного старения. Если подвижность примесных атомов столь велика, что средняя скорость их дрейфа оказывается того же порядка, что и средняя скорость

дислокации, то под действием высокого напряжения дислокации могут перемещать за собой окружающие их примесные группы атомов. Высокая скорость деформации при той же температуре приводит к отрыву дислокаций от этих групп, и деформация будет происходить при более низком напряжении. При этом наблюдается обратная зависимость напряжения от скорости истинной деформации [17].

Появление зуба текучести вызвано тем, что скорость дислокации сильно зависит от напряжения. Вначале от примесных групп атомов отрывается небольшое число дислокаций; для того чтобы кристалл растягивался с той же скоростью, с какой перемещаются захваты испытательной машины, скорость этих дислокаций должна быть высока. Небольшое число дислокаций сможет обеспечить задаваемую движением захватов нагружающего устройства скорость деформации, если действующее на них напряжение велико. Результатом действия высокого напряжения является увеличение числа источников дислокаций при двойном поперечном скольжении. По мере увеличения числа подвижных дислокаций их скорость падает и, следовательно, резко уменьшается напряжение. Эти представления согласуются с экспериментальными данными о том, что большой зуб текучести возникает при высоких скоростях деформации [17]. Однако Сильвестрович и Холл [18] 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. Их обнаружили впервые Портевейн и Ле-Шателье [19] при исследовании дюралюмина, а вскоре Эренфест и Иоффе [20] и Классен-Неклюдова [21] при исследовании каменной соли. В пластической области, когда кристалл деформируется при действии постоянного напряжения, неустановившаяся ползучесть также протекает скачкообразно. Этот эффект наиболее заметен при комнатной температуре в разбавленных твердых растворах на основе цинка, алюминия и др.; он наступает после предварительной однородной пластической деформации. Его наблюдали также в весьма чистых кристаллах цинка при температуре жидкого азота [22].

Коттрелл [23] объяснил это явление взаимодействием примесей или вакансий с дислокациями. Этот эффект наблюдается при увеличении скорости деформирования материала.

Следует отметить зависимость характеристик прочности от скорости деформации полимерных материалов [24–26].

Для полимеров характерно повышение предела прочности с увеличением скорости нагружения. При этом уменьшается влияние неупругих деформаций. С уменьшением скорости нагружения влияние неупругих деформаций возрастает [27].

Испытания бутадиен-стирольных вулканизаторов на разрыв, проведенные при скоростях растяжения 0,0417; 0,345; 3,191; 31,917%/с, показали, что между разрушающим напряжением и скоростью растяжения с точностью ~10% соблюдается зависимость следующего вида [28]:

$$\sigma_p = \alpha V^n, \quad (1)$$

где σ_p – разрушающее напряжение, рассчитанное на действительное сечение; V – скорость растяжения; α и n – константы.

Накопленные данные свидетельствуют о том, что процесс разрушения полимеров не является единым как при статических, так и при меняющихся нагрузках. В общем случае переход от одного режима испытания к другому может сопровождаться различными изменениями структуры материала в месте разрыва и превращением части механических потерь при многократных деформациях в энергию химических реакций.

При условии действия больших напряжений в хорошо ориентированных полимерах, когда приняты меры для предотвращения саморазогрева образцов [29–34], существенную роль будет играть длительность действия нагрузок.

Общим явлением при испытаниях твердых тел является рост разрушающего напряжения со скоростью нагружения. Однако известны факты, свидетельствующие об отклонении поведения полимеров от указанной закономерности. В большинстве случаев это наблюдается при испытании эластомеров при больших скоростях деформации или при низких температурах [28].

Вследствие зависимости прочностных и деформационных характеристик материалов от скорости деформирования возникает необходимость представления диаграмм деформирования в трехмерной системе координат для оценки изменения механического поведения материала в процессе испытания при различных скоростях нагружения.

Зависимость механических свойств материалов от скорости деформирования связана с влиянием времени, что позволяет выразить ее в достаточно общем виде с помощью функции [35–37]

$$F(\sigma, \varepsilon, t) = 0, \quad (2)$$

где σ – напряжение; ε – деформация; t – время.

Функция (2) описывает механическое поведение материалов при различных законах нагружения. Если ее представить в виде

$$\sigma = \Phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформирования,

то функцию можно использовать для характеристики чувствительности механических свойств материалов к скорости деформирования. Функции (2) и (3) изображаются в трехмерном пространстве σ, ε, t или $\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}$ в виде поверхностей деформирования [38]. Они могут быть представлены в виде семейства кривых деформирования,

полученных в серии экспериментов при соблюдении в каждом из них определенного и идентичного закона изменения во времени напряжения в образце или его деформации – параметра испытания [11]:

$$\sigma = \sigma(t); \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(t). \quad (5)$$

Функциям (2) и (3) в пространстве σ, ε, t соответствуют линии в плоскостях $\sigma-t$ и $\varepsilon-t$, которые являются проекциями диаграммы деформирования (рис. 1).

В трехмерном пространстве совокупность диаграмм деформирования представляет собой поверхность, по геометрической форме которой удобно оценивать влияние скорости деформирования на механические свойства материалов. Построение объема деформирования позволяет оценить механические свойства материалов при приложении и снятии нагрузки с зависимостью размера петли гистерезиса от скорости нагружения. Таким образом, исследование влияния скорости деформирования материалов на их механическое поведение удобно проводить с помощью трехмерных диаграмм в координатах «напряжение, деформация, время». В связи с этим актуален вопрос построения трехмерных диаграмм деформирования.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 3.3. «Технологии прогнозирования свойств, моделирования и реализации современных процессов конструирования и производства изделий из неметаллических и композиционных материалов с использованием цифровых методов, совместимых с CAD/CAM/CAE и PLM системами» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [39, 40].

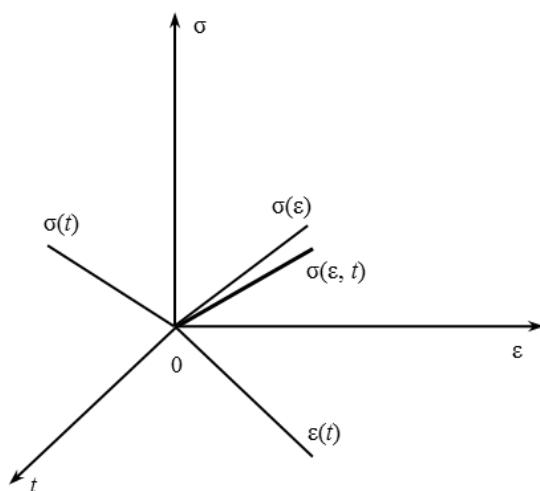


Рис. 1. Проекция диаграммы деформирования на плоскости $\sigma-0-t$, $\sigma-0-\varepsilon$, $\varepsilon-0-t$

Материалы и методы

Диаграмма в 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.

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

«Жесткое» нагружение – метод, в котором управляющим параметром испытания является деформация. Основное преимущество «жесткого» нагружения – получение диаграмм деформирования при большой скорости протекания высокоэластической и 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. 2), где ось ξ – линия пересечения этой плоскости с плоскостью $\varepsilon-t$.

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

$$\xi = \sqrt{\varepsilon^2 + (bt)^2} = t\sqrt{\dot{\varepsilon}^2 + b^2}, \quad (6)$$

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

Скорость деформирования образца на рабочей длине определяется выражением:

$$\dot{\varepsilon} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (7)$$

где φ – угол между плоскостями $\sigma-\xi$ и $\sigma-t$ (рис. 2).

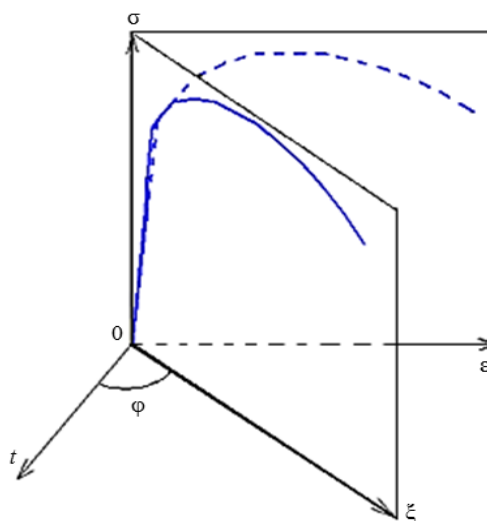


Рис. 2. Представление диаграммы деформирования в трехмерной системе координат и ее проекция на 2D-систему

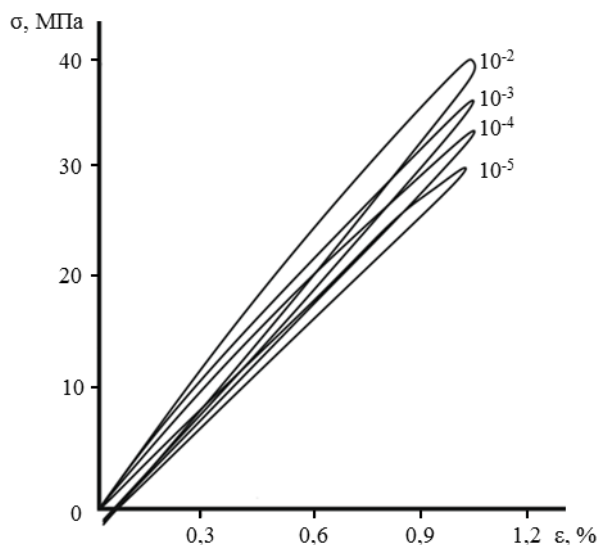


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов из органического стекла СО-120 при скоростях деформирования от 10^{-5} до 10^{-2} c^{-1}

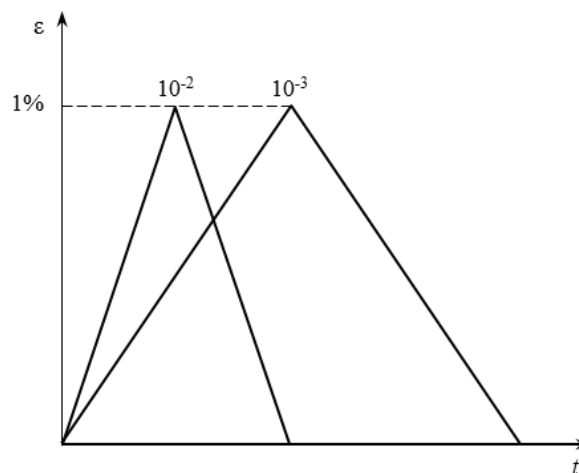


Рис. 4. Изменение деформации образцов в процессе испытаний с различными скоростями деформирования

Чем меньше угол φ , тем больше напряжение зависит от фактора времени, тем ближе плоскость σ - ξ к плоскости σ - t и тем ближе «жесткое» нагружение к «мягкому».

Рассмотрим испытания на растяжение органического стекла СО-120 при скоростях деформирования от 10^{-5} до 10^{-2} c^{-1} (рис. 3). Процесс испытания во времени представлен на рис. 4.

По результатам испытаний на растяжение органического стекла СО-120 в диапазоне скоростей нагружения от 10^{-5} до 10^{-2} c^{-1} получен массив данных по параметрам: напряжение, деформация, время. По этим данным построены трехмерные диаграммы деформирования органического стекла СО-120 в программе ANSYS Mechanical APDL, позволяющей строить практически любую точную геометрическую форму как с помощью удобного графического интерфейса пользователя, так и с помощью параметрического языка APDL [41–45].

APDL – это параметрический язык разработчика ANSYS (ANSYS Parametric Design Language), очень похожий на язык ФОРТРАН 77. Он используется для широкого круга задач, в том числе для простого взаимодействия между пользователем и системой.

Результаты

В работе [41] описана методика построения трехмерных диаграмм деформирования материала в программе ANSYS Mechanical APDL с помощью графического интерфейса пользователя. Рассматривается вариант построения трехмерной диаграммы по данным 2D-диаграммы. Но такой способ не всегда удобен – например, если есть возможность получить массив данных с помощью испытательной машины по параметрам

«деформация, напряжение, время», то быстрее построить 3D-диаграмму с помощью ввода команд на языке APDL.

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).

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

Построим координатные оси, соответствующие оптимальному масштабу диаграмм деформирования, задав координаты точки начала системы координат и точек, соответствующих осям x, y, z (σ, ϵ, t):

```
/PREP7
k, 1, 0, 0, 0
k, 2, 0, 20, 0
k, 3, 15, 0, 0
k, 4, 0, 0, 25
```

Соединим построенные точки прямыми линиями, образующими координатные оси:

```
LSTR, 2, 1
LSTR, 3, 1
LSTR, 1, 4
```

Для органического стекла СО-120 в программе EXCEL из всего массива данных, полученных с

Таблица 1

Команды для создания ключевых точек, описывающих диаграмму деформирования органического стекла СО-120 в координатах (σ , ε , t)

Имя команды	Номер точки	x	y	z
k ,	51,	0.37,	0.50,	0.19
k ,	56,	2.26,	2.51,	1.14
k ,	61,	4.18,	4.42,	2.10
k ,	66,	6.08,	6.18,	3.05
k ,	71,	8.00,	7.89,	4.00
k ,	76,	10.12,	9.64,	5.06
k ,	81,	8.90,	8.10,	6.56
k ,	86,	5.37,	4.74,	8.33
k ,	91,	0.48,	-0.05,	10.77

Таблица 2

Команды для активации ключевых точек, описывающих диаграмму деформирования материала в координатах (σ , ε , t)

Имя команды	Параметр	Номер точки
<i>FITEM</i> ,	3,	1
<i>FITEM</i> ,	3,	56
<i>FITEM</i> ,	3,	61
<i>FITEM</i> ,	3,	66
<i>FITEM</i> ,	3,	71
<i>FITEM</i> ,	3,	76
<i>FITEM</i> ,	3,	81
<i>FITEM</i> ,	3,	86
<i>FITEM</i> ,	3,	91

помощью испытательной машины, по значениям «напряжение, деформация, время» выберем точки, описывающие диаграмму деформирования со скоростью 10^{-5} с^{-1} . Приведем значения напряжений, деформаций и времени к масштабу, соответствующему созданным координатным осям.

Шаблон, в графах которого представлены все координаты выбранных точек, описывающих диаграмму деформирования органического стекла СО-120 со скоростью 10^{-5} с^{-1} , показан в табл. 1.

Следующая команда указывает количество точек, которые будут объединены между собой кривыми, образуя диаграмму деформирования материала:

FLST,3,9,3

Указываем 9 точек с учетом точки 1 в начале системы координат.

Следующие команды активируют 9 точек, описывающие диаграмму деформирования со скоростью 10^{-5} с^{-1} (табл. 2).

Для соединения точек сплайном используем команду

BSPLIN, ,P51X

Таким образом, с помощью копирования данных в шаблон и введения полученных команд в командную строку ANSYS построена диаграмма

деформирования органического стекла СО-120 со скоростью деформирования 10^{-5} с^{-1} (рис. 5). Диаграмма деформирования лежит в двух плоскостях – нагружения ξ и разгрузки γ (рис. 6).

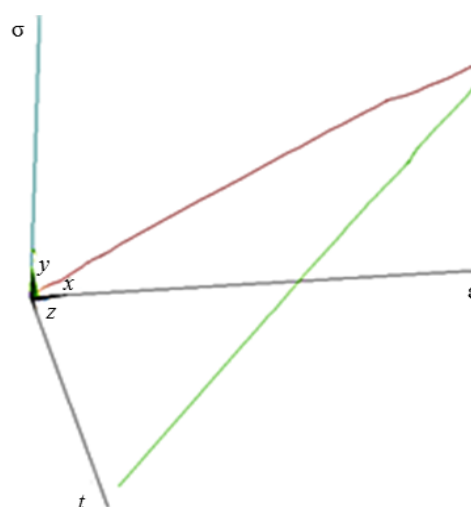


Рис. 5. Трехмерная диаграмма деформирования образца из органического стекла СО-120 при скорости деформирования 10^{-5} с^{-1}

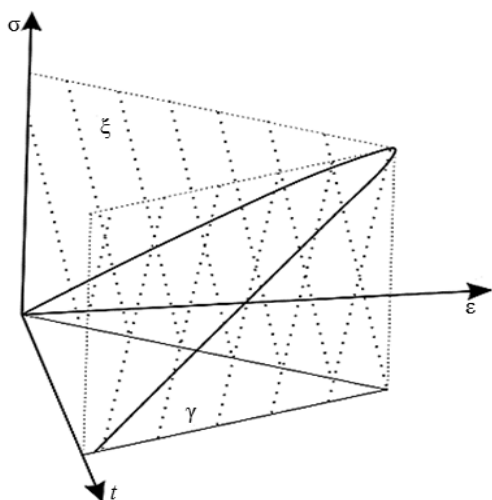


Рис. 6. Плоскости нагружения ξ и разгрузки γ образца из органического стекла СО-120 при скорости деформирования 10^{-5} c^{-1}

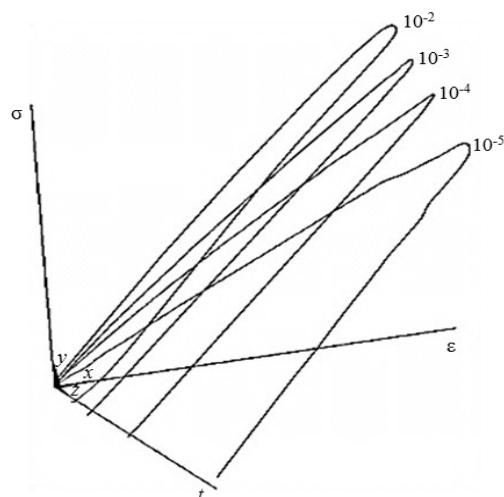


Рис. 7. Трехмерная диаграмма деформирования образца из органического стекла СО-120 при скоростях деформирования от 10^{-5} до 10^{-2} c^{-1}

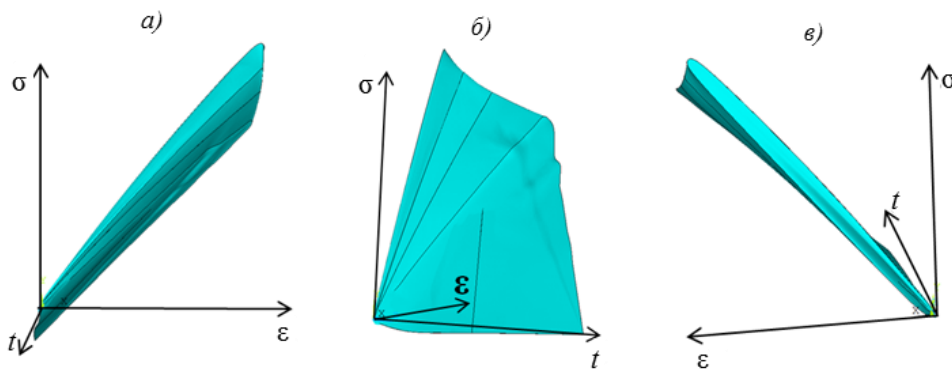


Рис. 8. Трехмерные диаграммы деформирования оргстекла СО-120 при растяжении со скоростями деформирования $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} \text{ c}^{-1}$

На рис. 7 представлены диаграммы деформирования материала СО-120 при различных скоростях деформирования, построенные по описанной методике.

Построив трехмерные диаграммы с разными скоростями деформирования, соединим их сплайном и по полученным линиям создадим поверхности (Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines), получив объем деформирования органического стекла СО-120, описывающий механическое поведение материала при нагрузке и разгрузке с характерными петлями гистерезиса (рис. 8).

На рис. 8 показаны трехмерные диаграммы деформирования органического стекла СО-120, когда на них смотрят под разными углами. Видно, что наибольший гистерезис наблюдается при высоких скоростях деформирования. С увеличением скорости деформирования увеличивается сопротивление органического стекла СО-120 деформированию, а максимальный уро-

вень напряжений наблюдается при скорости деформирования 10^{-2} c^{-1} . При разгрузке проявляется высокоэластическая деформация материала (при деформации около нуля возникают отрицательные напряжения).

Анализ трехмерной диаграммы деформирования органического стекла СО-120 в координатах (σ, ϵ, t) позволил выявить закономерности изменения механических свойств материала в зависимости от скорости его деформирования.

Представление результатов испытания в трехмерной системе осей «напряжение, деформация, время» позволяет сконструировать в пространстве большой объем информации, построить поверхности и объемы деформирования материала для оценки влияния скорости деформирования материала на его механические свойства, визуализирует реальные процессы управления испытанием и регистрации его результатов.

Обсуждение и заключения

Рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение конструкционных материалов: деформации, напряжения и времени.

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.

Для построения трехмерных диаграмм де-

формирования материала предложена программа ANSYS Mechanical, позволяющая строить практически любую точную геометрическую форму как с помощью удобного графического интерфейса пользователя, так и с помощью параметрического языка APDL.

Разработана и описана методика построения трехмерных диаграмм деформирования σ – ε – t . На примере результатов испытаний органического стекла СО-120 построены поверхности и объем деформирования материала, описывающий его механические свойства при нагрузке и разгрузке с характерными петлями гистерезиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // *Материаловедение*. 2016. №11. С. 17–21.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России. // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС, 1998. 401 с.
4. Зинер К. Упругость и неупругость металлов. М.: Изд. иностр. лит., 1954. 396 с.
5. Беляев В.И., Ковалевский В.И., Смирнов Г.В., Чекан В.А. Высокоскоростная деформация металлов. Минск: Наука и техника, 1976. 224 с.
6. Кольский Г. Новейшие экспериментальные и теоретические исследования эффектов кратковременного нагружения // *Успехи механики деформируемых сред*. М.: Наука, 1975. С. 269–281.
7. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1991. 288 с.
8. Баррет Ч.С., Масальский Т.Б. Структура металлов. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. Ч. 2. 685 с.
9. Григорьев Е.Г., Перлов Ю.А., Соловьев Г.И., Удовский А.Л., Якушин В.Л. Физическое материаловедение: учеб. для вузов в 6 т. М.: МИФИ, 2008. Т. 4: Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. 696 с.
10. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. М.: Машиностроение, 1970. С. 217–220.
11. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Наука, 1980. 222 с.
12. Bitans K., Whitton P.W. High-strain-rate investigations, with particular reference to stress/strain characteristics // *International Materials Reviews*. 1972. Vol. 17. P. 66–68.
13. Campbell J.D., Fergusson W.G. The temperature and strain rate dependence of the shear strength of mild steel // *Philosophical Magazine*. 1970. Vol. 21. No. 169. P. 63–82.
14. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. М.: Наука, 1965. 180 с.
15. Banks E.E. The ductility of metals under explosive loading conditions // *Journal Institute of Metals*. 1968. Vol. 96. No. 12. P. 375–378.
16. Петушков В.Г., Степанов Г.В. О постановке высокоскоростных механических испытаний материалов // *Проблемы прочности*. 1972. №3. С. 92–96.
17. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. Пер. с англ. под ред. Е.М. Морозова, Б.М. Струнина. М.: Мир, 1970. С. 163–165.
18. Благовещенский В.В., Панин И.Г. К вопросу о зубе текучести. *Физика металлов и материаловедение*. 2010. Т. 109. №3. С. 310–313.
19. Portevin A., Le Châtelier F. Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. 1923. Vol. 176. P. 507–510.
20. Путилов К.А. Курс физики. Том I. Механика, акустика, молекулярная физика, термодинамика. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. С. 173–174.
21. Классен-Неклюдова М.В. Дислокации и механические свойства кристаллов. М.: Изд. иностр. лит., 1960. 552 с.
22. Троицкий О.А. Моделирование действия Пинч-Эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла // *Вопросы атомной науки и техники*. 2011. №4. С. 124–127.
23. Cottrell A.H. Vacancies and Other Point Defects in Metals and Alloys // *Institute of Metals*. London, 1958. P. 1–40.
24. Гуль В.Е., Коврига В.В., Еремина Е.Г. Исследование характеристик прочности полимеров при больших скоростях деформации // *Высокомолекулярные соединения*. 1960. Т. 2. №11. С. 160.
25. Догадкин Б.А., Сандомирский Д.М. Влияние температуры и скорости растяжения на прочность вулканизатов // *Коллоидный журнал*. 1951. Т. 13. №4. С. 267.

26. Матренин С.В., Овечкин Б.Б. Композиционные материалы и покрытия на полимерной основе: учеб. пособие. Томск, 2008. С. 28–32.
27. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. С. 439–442.
28. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1978. С. 147–148.
29. Селихова С.И., Маркова Г.С., Каргин В.А. Применение электронной дифракции для изучения структуры сферолитов полипропилена // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6. С. 1132.
30. Лексовский А.М., Регель В.В. Долговечность полимеров при циклическом нагружении. Высокомолекулярные соединения. 1965. Т. 7. №6. С. 1045.
31. Лексовский А.М., Регель В.В. Температурно-временная зависимость прочности алюминия при статическом и циклическом нагружениях // Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20. №2. С. 288–292.
32. Регель В.Р., Лексовский А.М. Изучение циклической усталости полимеров на основе представлений кинетической концепции разрушения // Механика полимеров. 1969. Т. 5. С. 70–96.
33. Ратнер С.Б., Коробов В.И. Саморазогрев пластмасс при циклической деформации // Механика полимеров. 1965. №3. С. 93–100.
34. Ратнер С.Б. Работоспособность пластмассы под нагрузкой и пути ее прогноза и повышения // Науч.-технич. реф. сб. Сер.: Реактивы и особо чистые вещества. М.: НИИТЭХИМ, 1979. №3 (153). С. 65.
35. Петушков В.Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев: Наукова думка, 2005. С. 85–86.
36. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
37. Рыбаков В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 207 с.
38. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Сопротивление материалов. М.: Физматгиздат, 1959. 372 с.
39. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
40. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
41. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве σ – ϵ – t // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
42. 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.
43. 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.
44. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стержней и пластин // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-74-79.
45. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y. Hybrid laminates for application in north conditions // Mechanics of Composite Materials. 2016. Vol. 52. No. 5. P. 973–990.