

УДК 539.214.9

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-296-304

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННОЙ ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ ПО ПОЛЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ШЕЙКЕ ОБРАЗЦА

© 2020 г.

Быков А.А., Буртелова Н.В.

ООО «Нефтегазовый центр МФТИ», Москва, Российская Федерация

aleks-bykov@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2020

Представлена методика определения истинной диаграммы нагружения материала по полю перемещения. Методика основывается на предположениях о совпадении начальных участков истинной и экспериментальной диаграмм нагружения, совпадении экспериментальных и расчетных максимальных нагрузок и совпадении расчетных и экспериментальных полей перемещения в шейке образца после испытания на растяжение. Использовались опубликованные в литературе результаты испытаний образцов из проволоки (сталь СВ-07Х16Н6) и формула поля перемещений. По предложенной методике определялись модуль Юнга, коэффициент Пуассона и пластическая кривая. Моделирование проводилось в программном пакете Abaqus по модели, основанной на гипотезе о единой кривой нагружения и однородном и изотропном упрочнении. Корректность определенных упругопластических свойств материала определялась по близости расчетных и измеренных диаграмм нагружения, максимальных значений расчетной и экспериментальной нагрузок и экспериментального и расчетного полей перемещений, а также по оценке диапазона нагрузок, в котором произошло разделение образца на части и попадание расчетного значения нагрузки разделения в указанный диапазон. В процессе применения методики было достигнуто удовлетворение всем сформулированным требованиям. Показано, что истинная диаграмма нагружения имеет площадку текучести, а также участок интенсивного (выпуклого вниз) участка упрочнения после нее. Полученные результаты полезны при моделировании узлов и агрегатов, а также технологических процессов, в которых материал пластически деформируется и требуется повышенная точность расчета изменения их геометрической формы. Приведены в табличном виде результаты определения упругопластических свойств материала, необходимые для применения специалистами в их профессиональной деятельности.

Ключевые слова: истинная диаграмма нагружения, пластические деформации, поле перемещения, одноосное растяжение, численное моделирование.

Введение

В ракетно-космической отрасли приняты нормы прочности [1], допускающие в штатном режиме пластическое деформирование материала изделия с соответствующим упрочнением. Это позволяет уменьшить массу изделий и повысить массовую эффективность ракет-носителей.

Применение таких подходов повышает требования к точности расчетов именно пластического деформирования изделий при штатных нагрузках и оценке их геометрических размеров. Расчет напряженно-деформированного состояния, как правило, ведется с помощью моделей, основанных на гипотезе об однородном и изотропном упрочнении и ассоциированном законе пластического деформирования. Для подобных расчетов необходимо определить «истинную диаграмму нагружения» – зависимость деформаций от напряжений при условии, что в процессе испытания образца не образуется шейка [2–5]. На практике истинная диаграмма нагружения получается таким подбором точек, чтобы при расчете образовывалась шейка, а расчетная кривая удовлетворительно описывала экспериментальную кривую. Примеры подобного подхода можно найти в [3–8]. При таком подходе истинная диаграмма нагружения определяется по близости расчетной и экспериментальной диаграмм, а сравнению расчетных и экспериментальных перемещений каких-либо точек на образце для верификации уделяется меньше внимания.

Описанный подход применим в случае, когда образец короткий, то есть шейка занимает значительную часть длины рабочей части образца. Для длинных образцов имеет смысл добиваться близости экспериментальных и расчетных диаграмм нагружения только на начальных участках, и потому требование разработки методики определения истинной диаграммы нагружения здесь стоит более остро.

В настоящей статье предлагается методика определения истинной диаграммы нагружения на основе измеренного поля перемещений в шейке образца, что позволяет использовать ее как для длинных, так и для коротких образцов.

Для определения поля перемещения используются различные методы: VIC-3D – по метам на внешней поверхности образцов [9], метод спекл-интерферометрии [10], с помощью нейронной сети [11], рентгеновские методы [12–19]. В некоторых публикациях, использующих рентгеновскую томографию, например [17], поле перемещения определяется по крупным внедренным частицам. В настоящей статье поле перемещения определяется по внутренним дефектам.

Экспериментальные результаты измерений

Основные результаты экспериментальной работы и методики определения поля перемещений в шейке описаны в статье [19]. В процессе эксперимента образцы из проволоки из стали СВ-07Х16Н6 диаметром 1,93 мм и длиной 240 мм подвергались растяжению до разрушения, затем шейка образцов томографировалась. Диаграмма нагружения показана на рис. 1а, сечение трехмерного изображения – на рис. 1б.

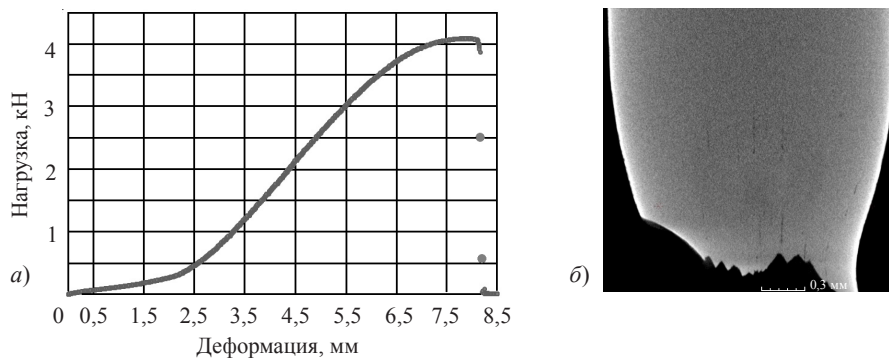


Рис. 1

Особенностью образцов являлось большое количество нитевидных дефектов. На начальном этапе деформирования до образования шейки дефекты параллельны оси проволоки, далее они искривляются по следующему закону:

$$U_r(r, z) = (0,682z^2 - 0,542z - 0,43)r^2 \exp(-1,26z) + 0,55r \exp(-2,2z^2). \quad (1)$$

Анализ экспериментальной диаграммы нагружения

На экспериментальной диаграмме нагружения (см. рис. 1а) видны характерные участки: нелинейный участок распрямления проволоки, линейный участок упругого деформирования, участок пластического деформирования. В конце испытания происходит почти мгновенное разрушение образца, после чего датчик нагрузки показывает нуль, хотя деформирование продолжается.

Первый участок образуется вследствие того, что образец из проволоки не является идеально прямым цилиндром и в начале деформирования он выпрямляется. Можно считать, что на втором участке происходит только упругое деформирование. По углу наклона этого участка можно определить модуль Юнга материала. На третьем участке начинается пластическое деформирование и образуется шейка, достигается некоторая максимальная нагрузка, после которой нагрузка начинает падать до момента разрушения. В точке потери линейности диаграммы нагружения можно с некоторой точностью определить предел текучести. При деформировании внутри шейки в сечении с наименьшим диаметром образуется магистральная трещина, рост которой настолько быстрый, что датчики не успевают записать показания в процессе ее роста. Считается, что трещина начинает расти в центральной части образца, что подтверждается экспериментальными результатами Мак-Грегора [2]. Также это позволяет сделать предположение, что в большей части шейки в процессе роста магистральной трещины пластические деформации не растут, и потому поле перемещений после разделения образца на две части можно считать «замороженным» и не подвергшимся изменениям самим разрушением.

При испытании показания датчика записываются через равные промежутки времени, поэтому приращения удлинения образца при постоянной скорости деформирования будут одинаковыми за эти промежутки времени. Записанное значение нагрузки перед разрушением еще не является нагрузкой в момент возникновения магистральной трещины. В представленном эксперименте три последних показания дали значения нагрузки 3932, 3904 и 3856 Н. Однако если бы магистральной трещины не возникло, то шейка продолжила бы развиваться и следующее показание нагрузки оказалось бы меньше нагрузки разрушения. Тогда, если аппроксимировать указанные точки параболой, можно получить значение нагрузки, равное 3180 Н. Таким образом, можно оценить, что разрушение наступило при значении нагрузки от 3180 до 3856 Н.

Методика определения истинной диаграммы нагружения

Основной моделью в методике является модель упругопластического деформирования с применением гипотезы об однородном и изотропном упрочнении. Зависимость напряжений от упругих деформаций задается законом Гука для однородного изотропного тела. Необходимо задать зависимость интенсивности девиатора напряжений от интенсивности пластических деформаций. Для численного моделирования использовался программный пакет Abaqus [20], в котором упругие свойст-

ва материала задавались коэффициентом Пуассона и модулем Юнга, а пластические свойства задавались пластической кривой. Подразумевается, что эта кривая получена при испытании на одноосное растяжение образца без образования шейки и представляет собой зависимость напряжений от пластических деформаций. Поэтому задача определения истинной диаграммы нагружения состоит в поиске упругих постоянных и наиболее подходящей пластической кривой.

Для истинной диаграммы нагружения в результате поиска упругопластических свойств материала численный расчет должен показать следующее:

- 1) на начальном участке экспериментальная и расчетная диаграммы нагружения должны совпадать (до образования шейки);
- 2) максимальная нагрузка при численном расчете должна быть близка к максимальной нагрузке, полученной экспериментально;
- 3) расчетное поле перемещений должно удовлетворительно совпадать с экспериментальным полем перемещений при нагрузке, попадающей в оцененный заранее диапазон значений.

Пластическая кривая является непрерывной, представим ее в кусочно-линейном виде:

$$\sigma(e) = \sigma(e_{i-1}) + k_i(e - e_{i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \sigma(0) = \sigma_T, \quad e_0 = 0. \quad (2)$$

Ряд значений деформаций e_i выбирается заранее, не обязательно через равные промежутки. Как видно, при заданных значениях коэффициентов наклона прямых k_i значения напряжений в каждом промежутке определяются всеми постоянными из предыдущих промежутков деформаций. Для каждой такой кривой при заданных значениях e_i и k_i , а также значениях модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν можно провести расчет и получить при различных растяжениях образца некоторое поле перемещений в шейке. В данном случае не обязательно для численного расчета строить длинный образец, достаточно моделировать деформирование небольшой части образца.

Для определения удовлетворительности полученного поля перемещений можно поступить следующим образом. В модели шейки удобным способом определить перемещения (достаточно только радиальные) U_j в некотором количестве точек, равномерно распределенных в шейке образца. Провести расчет и при некоторой нагрузке определить перемещения u_j в них, затем вычислить неотрицательную функцию, которая равна нулю, если перемещения совпали:

$$M = \sum_j (U_j - u_j)^2. \quad (3)$$

Этапы методики определения пластической кривой и упругих постоянных:

- 1) испытание образца на растяжение до разрушения;
- 2) оценка предела текучести материала по диаграмме нагружения, модуля Юнга по линейной части, максимального значения нагрузки, диапазона нагрузки разрушения аппроксимацией параболой диаграммы нагружения;
- 3) определение поля радиальных перемещений с помощью рентгеновской томографии по длинным нитевидным дефектам в образце по методике [19];
- 4) задание значения модуля Юнга, коэффициента Пуассона и параметров пластической кривой;
- 5) расчет диаграммы нагружения образца в программном пакете Abaqus;

б) сравнение участков до образования шейки расчетной и экспериментальной диаграмм нагружения, максимального значения нагрузки с экспериментальным значением;

7) минимизация функционала (2) методом градиентного спуска варьированием параметров k_i . Если совпадения неудовлетворительны, то вернуться к п. 4.

При выполнении п. 4–6 можно варьировать только модуль Юнга, коэффициент Пуассона и некоторое количество первых параметров пластической кривой, а при выполнении п. 7 варьировать остальные параметры.

Непосредственное применение предложенной методики к материалу СВ-07Х16Н6 было с некоторыми особенностями. Поскольку при испытании не измерялись поперечные деформации, то значение коэффициента Пуассона было принято равным 0,29 [19]. Модуль Юнга определялся по линейной части диаграммы нагружения и оказался равным 76 ГПа, что не совпало со справочным значением. Также для расчета и минимизации функционала (2) были выбраны точки в шейке образца, которые находились на внешней поверхности. Для сравнения исходная диаграмма нагружения была преобразована таким образом, чтобы начальный участок стал линейным.

В результате была определена удовлетворительная пластическая кривая, значения которой приведены в таблице 1 и на рис. 2а. На рис. 2б приведены расчетная и экспериментальная диаграммы нагружения, по которым видно совпадение их начальных участков и значений максимальных нагрузок.

Таблица 1

Пластическая кривая

Напряжение, МПа	850	1250	1320	1340	1400	1400,3	1400,6	1400,9
Деформация	0	0,0008	0,0012	0,0015	0,0023	0,0024	0,0025	0,0026
Напряжение, МПа	1401,2	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45
Деформация	0,0027	0,01	0,011	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Напряжение, МПа	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45
Деформация	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
Напряжение, МПа	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	1421,45	
Деформация	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	

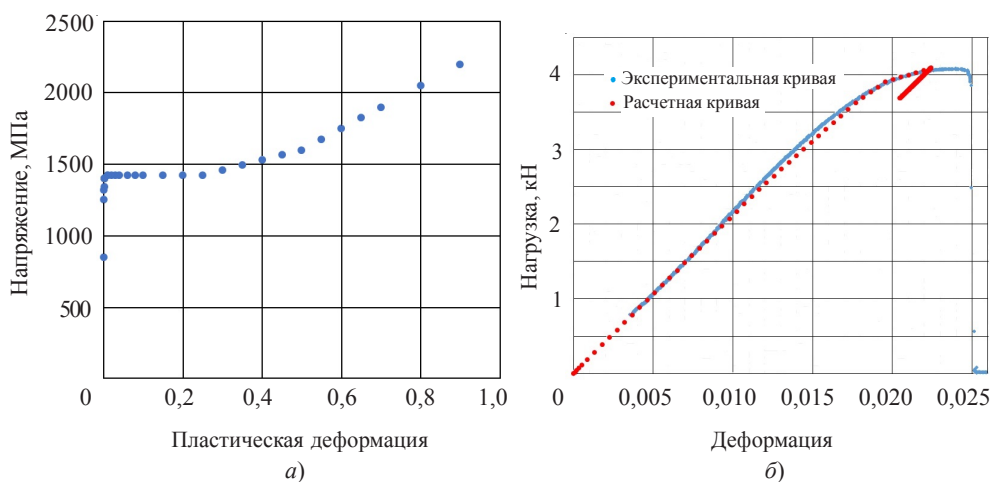


Рис. 2

На рис. 3 приведены граница шейки образца (верхние линии), положение нитевидных дефектов в нем (отдельные участки линий) и положение линий после деформирования, которые изначально были параллельны оси проволоки (линии вдоль всей длины образца), z – координата вдоль образца, r – координата по его радиусу.

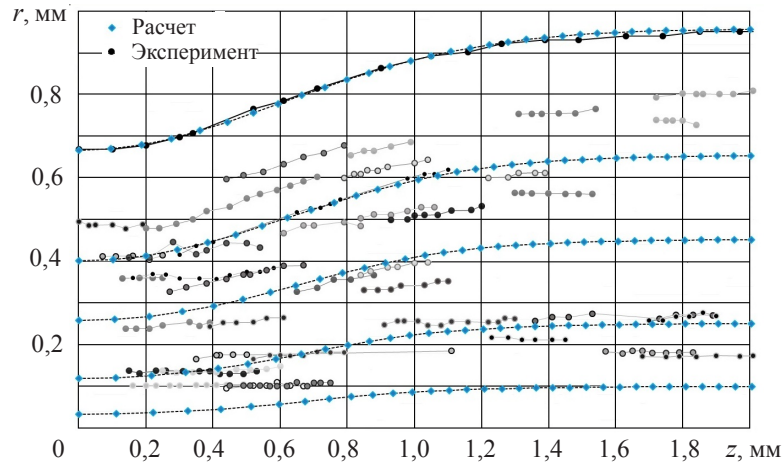


Рис. 3

На основе представленного рисунка можно утверждать, что поле перемещений найдено удовлетворительное. Расчетная нагрузка, при которой произошло разрушение, составило 3230 Н.

Заключение

Разработана методика нахождения истинной диаграммы нагружения, ее корректность показывается близостью измеренного и расчетного полей перемещений в шейке образца. Можно отметить, что полученная истинная диаграмма нагружения имеет площадку текучести, а также выпуклый вниз участок упрочнения.

Также следует отметить, что определение наилучшей кривой проводилось минимизацией функционала, который вычислялся по точкам, расположенным на поверхности шейки образца. Несмотря на этот «недостаток», расчетное поле перемещений удовлетворительно согласуется с экспериментальным, как показано на рис. 3. Однако перемещения точек на поверхности образца можно определить без использования метода рентгеновской томографии, применив, например, инструментальный микроскоп, и при этом получить достоверную диаграмму нагружения. Это означает, что п. 3 методики можно переформулировать без потери качества определения истинной диаграммы нагружения следующим образом: с помощью инструментального микроскопа измерить профиль шейки образца и определить радиальные перемещения точек его внешней поверхности. В качестве варьируемых параметров при минимизации функционала можно использовать не только коэффициенты k_i , но и значения деформаций e_i .

Задача определения пластических свойств материала является обратной задачей, строгого доказательства единственности решения которой неизвестно. Поэтому приведенную методику и результаты, полученные с ее помощью, нельзя считать единственно возможными. Пластическая кривая приведена для удобства специалистов, которым понадобится применить полученные результаты.

Список литературы

1. *Нормы прочности автоматических космических аппаратов (ГОСТ Р 56514-2015)*. М.: Стандартинформ, 2015. 27 с.
2. Nadai A. *Theory of Flow and Fracture of Solids*. Vol. 1. New York: McGraw-Hill, 1950. 572 p.
3. Казаков Д.А., Жегалов Д.В. Использование технологий цифровой фотосъемки для изучения полей деформаций. *Проблемы прочности и пластичности*. 2007. Вып. 69. С. 99–105.
4. Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л. Экспериментально-расчетный подход к исследованию деформационных и предельных характеристик упругопластических материалов. *Обратные краевые задачи и их приложения: Всерос. науч. конф. 20–24 окт. 2014 г.* Казань, Казанский федеральный ун-т. С. 1–11. <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/108632>.
5. Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л. Построение истинных диаграмм деформирования упругопластических материалов после образования шейки. *Матер. XI междуна-род. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016)*. 25–31 мая 2016 г. Алушта. С. 487–489.
6. Дерюгин Е.Е., Суворов Б.И. Стадийность «истинных» диаграмм нагружения поликристаллов α -Fe и высокопрочного сплава ВТ-6. *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13. №6. С. 73–79.
7. Водошнянов В.И., Кондратьев О.В., Травин В.В. К вопросу построения истинной диаграммы деформирования на стадии шейкообразования. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2007. Т. 73. №7. С. 53–58.
8. Савенков В.Н., Тимохин Ю.В., Тимохина В. Ю. Напряженно-деформированное состояние образца при упругопластическом растяжении. *Сб. науч. тр. Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2019. №53. С. 55–63.
9. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения VIC-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т. 77. №2. С. 162–171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.16.
10. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Лунев А.Г., Горбатенко В.В., Зуев Л.Б. Закономерности локализации пластического течения при электролитическом насыщении водоро-дом ОЦК-сплава железа. *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. Вып. 5. С. 51–58.
11. Yang H. et al. Exploring elastoplastic constitutive law of microstructured materials through artificial neural network – a mechanistic-based data-driven approach. *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87. Iss. 9. P. 091005–091014. <https://doi.org/10.1115/1.4047208>.
12. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. *Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние*. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. 280 с.
13. Бекренев А.Н., Миркин Л.И. *Малоугловая рентгенография деформации и разруше-ния материалов*. М.: Изд-во МГУ, 1991. 246 с.
14. Mazilkin A.A., Straumal B.B., Protasova S.G., Kogtenkova O.A., Valiev R.Z. Structural changes in aluminum alloys upon severe plastic deformation. *Physics of the Solid State*. 2007. Vol. 49. No 5. P. 868–873.
15. Kinney J.H., Nichols M.C. X-Ray tomographic microscopy (XTM) using synchrotron radiation. *Annual Review of Materials Science*. 1992. Vol. 22. P. 121–152. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.22.080192.001005>.
16. Marrow T.J., Buffiere J.-Y., Withers P.J., Johnson G., Engelberg D. High resolution X-ray tomography of short fatigue crack nucleation in austempered ductile cast iron. *International Journal of Fatigue*. 2004. Vol. 26. Iss. 7. P. 717–725. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.11.001>.
17. Withers Ph.J., Preuss M. Fatigue and damage in structural materials studied by X-Ray tomography. *Annual Review of Materials Research*. 2012. Vol. 42. P. 81–103. DOI: 10.1146/ANNUREV-MATSCI-070511-155111.
18. Ruiz P.D. Tomographic sensing of displacement fields. *Optical Sensors. 14–17 July 2013*. Rio Grande, Puerto Rico, United States, 2013. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2013.SW3D.2>.
19. Bykov A.A., Burtelova N.V., Molchanov V.S. Experimental determination of the radial displacement field in the neck of samples after a tensile test. *Technical Physics Letters*. 2019. Vol. 45. No 2. P. 72–74. DOI: 10.1134/S1063785019020044.
20. *Systemes D. Abaqus Analysis User's Manual*. Providence, USA: Simulia Corp., 2007. 679 p.

References

1. *Normy prochnosti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov (GOST R 56514-2015) [Strength Standards for Automatic Spacecraft (Standards R 56514-2015)]*. Moscow. Standartinform Publ. 2015. 27 p. (In Russian).
2. Nadai A. *Theory of Flow and Fracture of Solids*. Vol. 1. New York. McGraw-Hill. 1950. 572 p.
3. Kazakov D.A., Zhegalov D.V. Ispolzovanie tekhnologiy tsifrovoy fotos'emki dlya izucheniya poley deformatsiy [Using digital photography techniques for studying strain fields]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2007. Iss. 69. P. 99–105 (In Russian).
4. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L. Eksperimentalno-raschetnyy podkhod k issledovaniyu deformatsionnykh i predelnykh kharakteristik uprugoplasticheskikh materialov [Experimental and computational approach to the study of deformation and limit performance elastoplastic materials]. *Obratnye kraevye zadachi i ikh prilozheniya: Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya. [Boundary-Value Problems and their Applications: All-Russian Scientific Conference]*. 20–24 Okt. 2014. Kazan. Kazan Federal University. P. 1–11. <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/108632> (In Russian).
5. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L. Postroenie istinnykh diagramm deformirovaniya uprugoplasticheskikh materialov posle obrazovaniya sheyki [Construction of true diagrams of elastic-plastic materials deformation after neck formation]. *Materialy XI mezhdunarodnoy konferentsii po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh [Proceedings of the XI International Conference on Non-Equilibrium Processes in Nozzles and Jets. (NPNJ'2016)]*. 25–31 May 2016. Alushta. P. 487–489 (In Russian).
6. Deryugin E.E., Suvorov B.I. Stadiynost istinnykh diagramm nagruzheniya polikristallov α -Fe i vysokoprochnogo splava VT-6 [Stage character of true loading diagrams of α -Fe and high-strength VT-6 alloy polycrystals]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics Journal]*. 2010. Vol. 13. No 6. P. 73–79 (In Russian).
7. Vodopyanov V.I., Kondratev O.V., Travin V.V. K voprosu postroeniya istinnoy diagrammy deformirovaniya na stadii sheykoobrazovaniya [On the issue of constructing a true deformation diagram at the stage of neck formation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Plant Laboratory. Diagnostics of Materials]*. 2007. Vol. 73. No 7. P. 53–58 (In Russian).
8. Savenkov V.N., Timokhin Y.V., Timokhina V.Y. Napryazhenno-deformirovanoe sostoyanie obraztsa pri uprugoplasticheskom rastyazhenii [Stress-strain state of the sample under elastic-plastic deformation]. *Sb. nauch. tr. Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Collection of Scientific Papers of the Donetsk Railway Transport Institute]*. 2019. No 53. P. 55–63 (In Russian).
9. Tretyakova T.V. Osobennosti ispolzovaniya programmogo obespecheniya VIC-3D, realizuyushchego metod korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy, v prilozhenii k issledovaniyu poley neuprugikh deformatsiy [Singularities in using VIC-3D digital image correlation software and its application to the study of inelastic strain fields]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics]*. 2014. Vol. 77. No 2. P. 162–171 (In Russian).
10. Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Lunev A.G., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. Zakonomernosti lokalizatsii plasticheskogo techeniya pri elektroliticheskom nasyschenii vodorodom OTsK-splava zheleza [Regularities of localization of plastic flow during electrolytic hydrogen saturation of BCC-iron alloy]. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics Letters]*. 2014. Vol. 40. Iss. 5. P. 51–58 (In Russian).
11. Yang H. et al. Exploring elastoplastic constitutive law of microstructured materials through artificial neural network – a mechanistic-based data-driven approach. *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87. Iss. 9. P. 091005–091014. <https://doi.org/10.1115/1.4047208>.
12. Svergun D.I., Feygin L.A. *Rentgenovskoe i neytronnoe malouglovoe rasseyaniye [X-Ray and Neutron Small-Angle Scattering]*. Moscow. Nauka Publ. 1986. 280 p. (In Russian).
13. Bekrenev A.N., Mirkin L.I. *Malouglovaya rentgenografiya deformatsii i razrusheniya materialov [Small-Angle Radiography of Deformation and Destruction of Materials]*. Moscow. MGU Publ. 1991. 246 p. (In Russian).
14. Mazilkin A.A., Straumal B.B., Protasova S.G., Kogtenkova O.A., Valiev R.Z. Structural changes in aluminum alloys upon severe plastic deformation. *Phys. Solid State*. 2007. Vol. 49. No 5. P. 868–873.

15. Kinney J.H., Nichols M.C. X-Ray tomographic microscopy (XTM) using synchrotron radiation. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1992. Vol. 22. P. 121–152. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.22.080192.001005>.
16. Marrow T.J., Buffiere J.-Y., Withers P.J., Johnson G., Engelberg D. High resolution X-ray tomography of short fatigue crack nucleation in austempered ductile cast iron. *Int. J. Fatigue*. 2004. Vol. 26. Iss. 7. P. 717–725. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.11.001>.
17. Withers Ph.J., Preuss M. Fatigue and damage in structural materials studied by X-Ray tomography. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2012. Vol. 42. P. 81–103. DOI: 10.1146/ANNUREV-MATSCI-070511-155111.
18. Ruiz P.D. Tomographic sensing of displacement fields. *Optical Sensors. 14–17 July 2013*. Rio Grande, Puerto Rico, United States. 2013. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2013.SW3D.2>.
19. Bykov A.A., Burtelova N.V., Molchanov V.S. Experimental determination of the radial displacement field in the neck of samples after a tensile test. *Technical Physics Letters*. 2019. Vol. 45. No 2. P. 72–74. DOI: 10.1134/S1063785019020044.
20. *Systemes D. Abaqus Analysis User's Manual*. Providence, USA. Simulia Corp. 2007. 679 p.

DETERMINING THE TRUE LOADING DIAGRAM BY THE DISPLACEMENT FIELD IN THE SAMPLE NECK

Bykov A.A., Burtelova N.V.

Oil and Gas Center of MIPT, Moscow, Russian Federation

The article presents a technique for determining the true loading diagram of a material along the displacement field. The technique is based on the assumptions about the coincidence of the initial sections of the true and experimental loading diagrams, the coincidence of the experimental and calculated maximum loads, and the coincidence of the calculated and experimental displacement fields in the sample neck after tensile testing. The required test results of wire samples (steel SV-07X16N6) and the expression in the form of the formula for the displacement field were used published in the literature. Young's modulus, Poisson's ratio and plastic curve were determined by the method proposed in the work. Modeling was carried out in the Abaqus software package according to a model based on the hypothesis of a single loading curve and homogeneous and isotropic hardening. The correctness of certain elastic-plastic properties of the material was determined by the coincidence of the calculated and measured loading diagrams, the maximum values of the calculated and experimental load and the experimental and calculated displacement fields, as well as the assessment of the load range at which the sample was divided into parts, and the calculated values of the separation load data range. In the process of applying the methodology, the satisfaction of all formulated requirements was achieved. It is shown that the true loading diagram has a yield area, as well as a section of an intense (convex downward) section of hardening after it. The results obtained will be useful in modeling units and assemblies, as well as technological processes in which the material is plastically deformed and an increased accuracy of calculating changes in their geometric shape is required. The work also contains all the results of determining the elastic-plastic properties of the material in a tabular form, necessary for the use by specialists, for use in their professional activities.

Keywords: true loading diagram, plastic deformation, displacement field, uniaxial tension, numerical simulation.