



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕЛКО- И КРУПНОЗЕРНИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6101

DISTRIBUTION OF STRESSES IN FINE- AND COARSE-GRAINED CYLINDRICAL ALUMINUM ALLOY 6101 SAMPLES SUBJECTED TO STATIC TENSION

Д.К.Магомедова¹, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-1031-624X), А.А.Чуракова², к.ф.-м.н., науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-9867-6997) / churakova_a@mail.ru

D.K.Magomedova¹, Junior Researcher, A.A.Churakova², Cand. of Sc. (Physics and Mathematics), Researcher

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.1.30.34

Получено: 03.12.2020 г.

Проблема расчета прочности и долговечности различных конструкций из металлов является одной из важнейших в современном мире. Для ее решения необходимо понимание определенных механических критериев материала, таких как прочность, пластичность и др. [1, 2]. В данной работе приводятся данные расчета и указан характер распределения критических напряжений, которые определяют зарождение пор внутри материала, в данном случае в Al-6101, при статическом нагружении. Зарождение и слияние пор представляют собой первую стадию разрушения материала. При наличии данных о критических напряжениях материала можно спрогнозировать его дальнейшее разрушение [3, 4].

Calculation of strength and durability of various metal structures presents one of the most significant tasks in the contemporary world. To achieve it, the different mechanical criteria of the material, such as strength, ductility, etc. [1, 2] should be known. The calculation data and t distribution pattern of critical stresses that define formation of pores in the material (in our case, Al-6101) under static loading are presented in this article. The first phase of material fracture is the pore formation and merging. Therefore, its subsequent fracture can be estimated using the data on the critical stresses of the material [3, 4].

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость разработки и внедрения простых и в то же время эффективных критериев разрушения, позволяющих достоверно оценить условия безопасной эксплуатации металлических конструкций, в особенности конструкций с концентраторами напряжений, является очевидной в связи с созданием и увеличением числа инженерных сооружений сложной геометрии. Данная проблема актуальна для многих отраслей промышленности.

Известно, что в процессе разрушения материалов происходит превышение предела прочности на некотором характерном расстоянии в течение некоторого характерного времени. Развитие теоретических моделей, учитывающих нелокальный характер процесса разрушения и алгоритмизированных для использования в стандартных вычислительных пакетах (ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, Comsol), позволяет повысить точность прогноза момента разрушения конструкции и сократить

¹ Санкт-Петербургский государственный университет / Saint Petersburg State University.

² Институт физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН / Institute of Molecule and Crystal Physics of Ufa Federal Research Centre RAS.



затраты на экспериментальное сопровождение практического внедрения разработки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала использовался Al-6101 в виде цилиндрических образцов с различными диаметрами поперечного сечения. Часть исходных заготовок (крупнозернистый (КЗ) сплав) была подвергнута отжигу при температуре 550°C в течение двух часов и последующей закалке в воду комнатной температуры; после закалки они подвергались естественному старению (ЕС) в течение шести суток. Другая часть также подвергалась отжигу при температуре 550°C в течение двух часов и дальнейшему отжигу в течение 12 ч при температуре 170°C с последующей закалкой водой комнатной температуры – образцы с искусственным старением (ИС). Для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры часть заготовок была обработана ИПД-методом равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-К) [2].

Из КЗ- и УМЗ-заготовок были изготовлены одинаковые образцы с цилиндрической рабочей частью диаметром 5,0 и 2,8 мм (на 5-мм диаметре сделана дополнительная выточка) и высотой 34 мм. Использование в работе образцов разной геометрической формы было обусловлено необходимостью увидеть влияние геометрии на прочность и пластичность материала.

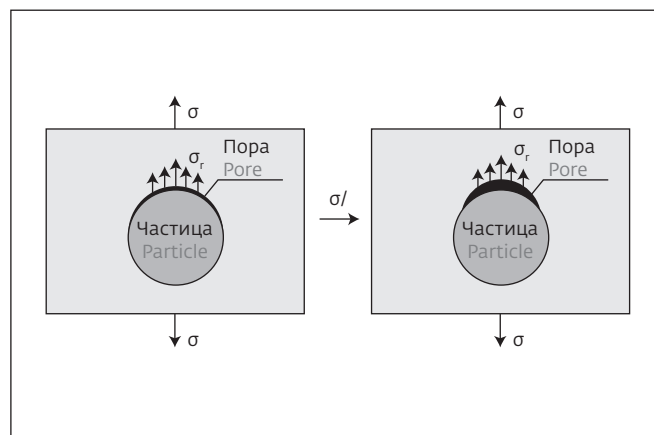


Рис.1. Схематическое изображение модели роста пор (интерфейс матрица / частица) при увеличении внешнего растягивающего напряжения

Fig.1. Schematic representation of the pore growth model (matrix / particle interface) at increasing of external tensile stress

Подробно эксперимент и полученные данные представлены в работе [5].

Механические испытания образцов на одноосное растяжение проводили на испытательной машине Shimadzu AG-50kNX. Растяжение образцов проводили при комнатной температуре с постоянной скоростью деформации $1,4 \cdot 10^{-4} \text{c}^{-1}$. Растяжение проводилось до разрушения образцов. Поверхность образцов в долевом сечении исследовалась с помощью электронного микроскопа.

INTRODUCTION

The need to develop and implement simple and, at the same time, effective fracture criteria that allow one to reliably assess the conditions for safe operation of metal structures, especially structures with stress concentrators, is obvious in connection with the creation and increase of the number of engineering structures of complex geometry. This problem is relevant for many industries. It is known that in the process of destruction of materials, the ultimate strength is exceeded at a certain characteristic distance for a certain characteristic time. The development of theoretical models that take into account the nonlocal nature of the fracture process and

are algorithmized for use in standard computing packages (ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, Comsol), makes it possible to increase accuracy of predicting the moment of structure failure and reduce the cost of experimental support for the practical implementation of the research.

RESEARCH METHODS

Al-6101 alloy was used in the form of cylindrical samples with different cross-sectional diameters. A part of the original work pieces (coarse-grained alloy, CGA) was annealed at a temperature of 550 °C for two hours and then quenched in water at room temperature; after hardening, they underwent natural aging (NA) for six days. The other part was

also subjected to annealing at a temperature of 550 °C for two hours and further annealing for 12 hours at a temperature of 170 °C, followed by quenching with water at room temperature – samples with artificial aging (AA). To obtain an ultra-fine-grained (UFG) structure, part of the work pieces were treated by SPD by equal-channel angular pressing according to Conform (ECAP-K) scheme [2].

Identical samples were made of CGA and UFG blanks with a cylindrical working part 5.0 and 2.8 in diameter (an additional groove was made on a 5-mm diameter) and 34 mm high. The use of samples of different geometric shapes in the work was due to the need to see the influence

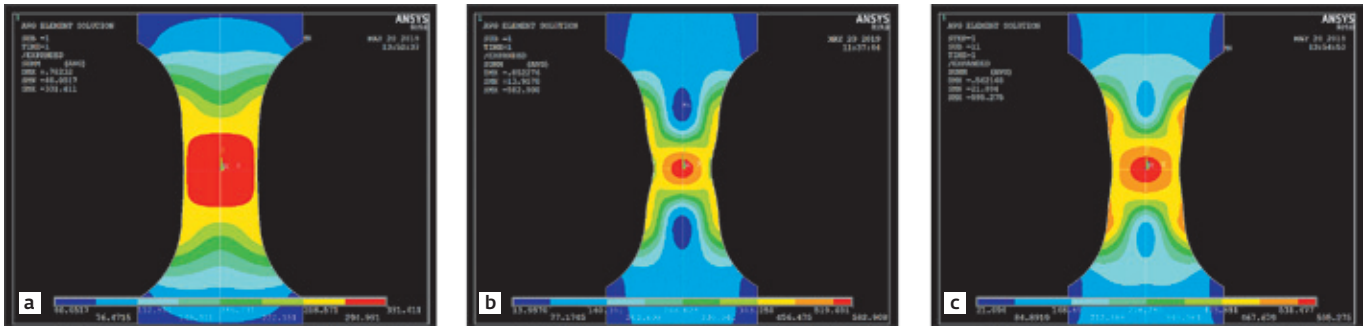


Рис.2. Картины распределения трехосных напряжений для образцов с диаметром поперечного сечения 5 мм в случае структурного состояния: а – ЕС, б – ИС, с – УМЗ

Fig.2. Triaxial stress distribution patterns for samples with a cross-sectional diameter of 5 mm in the case of a structural state: a – NA, b – AA, c – UFG

В основе методики расчета критических напряжений лежит статья [1]. Рассматриваем статическое нагружение при комнатной температуре и постоянной скорости растяжения. Самым широко используемым критерием является критическое значение напряжения на поверхности раздела металлическая матрица / частица (рис.1).

Расчет критического значения напряжения σ_r на поверхности раздела металлическая матрица / частица был впервые проведен группой Argon, Im и Needleman в [1], где критерий поробразования для стержней из крупнозернистой стали и меди с выточкой представлен как:

$$\sigma_m + \sigma_{eq} \geq q_r, \quad (1)$$

где $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – гидростатическое напряжение, $\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – эквивалентное напряжение, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные значения напряжений. Расчет для Al-6101 был проведен при использовании данного критерия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Был произведен расчет распределения трехосных (сумма эквивалентных и гидростатических) напряжений, полученных с помощью пакета ANSYS 19.0. Расчет проведен согласно данным с видеоэкстензометра и испытательной машины для каждой геометрии КЗ всех типов старения и УМЗ-образцов.

of geometry on the strength and plasticity of the material. The experiment and the data obtained are presented in detail in [5].

Uniaxial tension tests of the samples were carried out on a Shimadzu AG-50kNX testing machine. Stretching of the samples was carried out at room temperature with a constant strain rate of $1.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Stretching was carried out until the destruction of the samples. The surface of the samples in the fractional section was examined using an electron microscope.

The methodology for calculating critical stresses is based on paper [1]. We consider static loading

at room temperature and constant tensile rate. The critical stress at the metal matrix / particle interface is the most widely used criterion (Fig.1).

The calculation of the critical stress σ_r at the metal matrix / particle interface was first performed by the group of Argon, Im and Needleman in [1], where the pore formation criterion for coarse-grained steel and copper rods with grooves is presented as:

$$\sigma_m + \sigma_{eq} \geq q_r, \quad (1)$$

here $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – hydrostatic stress, and

$$\sigma_{eq} = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5}}{\sqrt{2}}$$

is equivalent voltage, where $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – principal stress values. The calculation for Al-6101 was carried out using this criterion.

RESULTS

The package was used to calculate the distribution of triaxial (the sum of equivalent and hydrostatic) stresses obtained using the ANSYS 19.0 package. The calculation was carried out according to the data from the video extensometer and the testing machine for each CGA geometry

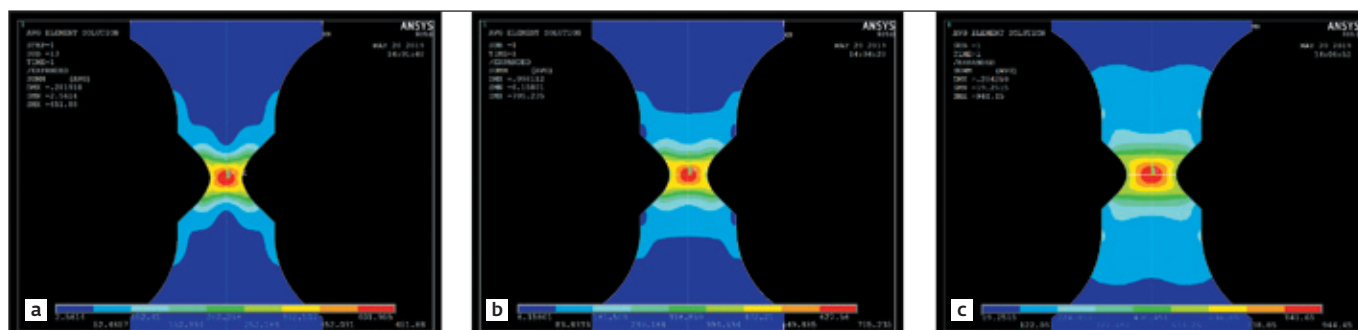


Рис.3. Картины распределения трехосных напряжений для образцов с диаметром поперечного сечения 2,8 мм в случае структурного состояния: а – ЕС, б – ИС, с – УМЗ

Fig.3. Triaxial stress distribution patterns for specimens with a cross-sectional diameter of 2.8 mm in the case of a structural state: a – NA, b – AA, c – UFG

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ распределения трехосных напряжений с учетом различия геометрий показывает, что выточка приводит к локализации значений напряжения в участке поперечного сечения, имеющего минимальный диаметр, при этом характер распределения трехосных напряжений зависит от геометрии выточки. Минимальные значения трехосных напряжений (220 МПа) относятся к КЗ-образцу ЕС (диаметром поперечного сечения 5 мм), в то время как максимальные значения трехосных напряжений (385 МПа) достигнуты в УМЗ-образце.

На прочность и пластичность материала влияет геометрия исследуемых образцов: образцы с более узкой рабочей частью оказываются наименее пластичными, но показывают более высокую

прочность. На прочность и пластичность также влияет структура материала: при уменьшении размера зерна увеличивается прочность.

ВЫВОДЫ

Применение модели Argon и результаты теоретического исследования распределения трехосных напряжений в образцах в ходе испытаний позволили определить критические напряжения при возникновении пор для двух исследуемых состояний: $\sigma_T \approx 220$ МПа для КЗ ЕС и $\sigma_T \approx 330$ МПа для КЗ ИС. Качественный анализ экспериментальных и теоретических результатов позволяет предположить, что величина критического напряжения при образовании пор в УМЗ-материале имеет более высокие значения.

of all types of aging and UFG samples.

DISCUSSION

Analysis of the triaxial stress distribution, taking into account the difference in geometries, shows that the groove leads to localization of stress values in the cross-section area of the minimum diameter, while the nature of the distribution of triaxial stresses depends on the geometry of the groove. The minimum values of triaxial stresses, 220 MPa, refer to the CGA specimen NA (cross-sectional diameter 5 mm), while the maximum values of triaxial

stresses, 385 MPa, have been achieved in the UFG specimen.

The strength and ductility of the material are influenced by geometry of the test specimens: specimens with a narrower working part turn out to be the least ductile, but show the higher strength. The strength and ductility are also influenced by the structure of the material: as the grain size decreases, the strength increases.

CONCLUSIONS

The use of the Argon model and the results of a theoretical study of the distribution of triaxial

stresses in the samples during the tests made it possible to determine the critical stresses at appearance of pores for two states under study: $\sigma_T \approx 220$ MPa for a short-circuit EC and $\sigma_T \approx 330$ MPa for a short-circuit IC. A qualitative analysis of the experimental and theoretical results suggests that the critical stress during formation of pores in the UFG material has higher values. ■

The authors are grateful to the Russian Science Foundation grant (No. 17-19-01311) and the St. Petersburg State University project Activity3 (id: 26130576).



Авторы выражают благодарность гранту РФФ (№ 17-19-01311) и проекту СПбГУ Мероприятие 3 (id: 26130576).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Argon A.S., Im J., Needleman A. Distribution of plastic strain and negative pressure in necked steel and copper bars. Metallurgical Transactions 824-volume 6A, April 1975.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
3. Murashkin M.Yu., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // J. Mater. Sci. (2016) 51, 33–49.
4. Murashkin M., Medvedev A., Kazykhanov V., Krokhin A., Raab G., Enikeev N. and Valiev R.Z. Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultrafine-Grained Al 6101 Alloy Processed via ECAP-Conform // Metals (2015) 5, 2148–2164.
5. Magomedova D.K., Gunderov D.V. and Efimov M.A. Mechanical behavior of coarse- and fine-grained Al-6101 samples of different geometry under tension IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 672 (2019).
6. Magomedova D.K. and Murashkin M.Yu. Influence of grain size and second phase particles on the process of void initiation IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 991 (2018).
7. Magomedova D.K., Murashkin M.Yu., Efimov M.A. Technique development for conducting

ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО АСЕПТИКА



МЕБЕЛЬ
ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

www.aseptica.biz

Тел.: (495) 585-88-15, (495) 640-23-49 E-mail: aseps5858815@gmail.com

mechanical tests to study the pore formation process in case of material fracture. AIP Conference Proceedings (1959), 2018.

НАНОТЕХНОЛОГИИ ПОМОГУТ СОЗДАТЬ ЕЩЕ ОДНУ ВАКЦИНУ ПРОТИВ COVID-19

С помощью нанотехнологий ученые из Кливленда разрабатывают перспективную вакцину против COVID-19, демонстрирующую высокую эффективность в моделях доклинических исследований.

Согласно данным, опубликованным в MBIO, вакцина формирует мощные нейтрализующие антитела, а также предотвращает симптомы заболевания. Преимущество новой разработки – термостабильность, обеспечивающая более удобное хранение и транспортировку. Иммунный ответ формируется наночастицами, спроектированными из ферритина – белка, имеющегося во всех живых организмах. Наночастицы белка включают минимизацию клеточных повреждений и обеспечивают более прочный иммунитет при более низких дозах, чем традиционные белковые субъединицы, используемые против других вирусов, например гриппа. Наночастицы ферритина используются для доставки крошечных, ослабленных фрагментов области белка SARS-COV-2, которые избирательно связываются с точкой входа вируса

в человека (этот фрагмент называется доменом связывания рецептора, или RBD). Когда SARS-COV-2 RBD связывается с белком человека под названием ACE2 (ангиотензин – преобразующий фермент 2), вирус может войти в клетки хоста и начать реплицироваться.

В рамках исследовательской модели вводится начальная доза препарата, затем два усилителя – на 14 и 28 день. Одна группа испытуемых получила вакцины внутримышечно, другая – внутримышечно и внутриназально. После введения второго усилителя у всех вакцинированных появились сильные нейтрализующие антитела. Это говорит о том, что повторное воздействие антигена RBD успешно подготовило иммунные системы для борьбы с вирусом. Вакцина с наночастицами ферритина химически стабильна и хорошо сохраняется при высокой температуре, открывая перспективы создания еще одной новой перспективной вакцины, удобной для хранения и транспортировки.

По материалам: <https://my.clevelandclinic.org>



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА



21-23

А П Р Е Л Я
2 0 2 1

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

ВЕДУЩЕЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА

+7 965 772 7759 | ptf@restec.ru | ptfair.ru