

UDC 539.3

CHARACTERISTICS OF THE DEFORMATION DIAGRAM OF AMg6 ALLOY

Serhii Fedak; Oleg Yasnii; Iryna Didych; Nadiya Kryva

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Summary. The parameters of the deformation of AMg6 alloy diagram under conditions of uniaxial tension were studied, taking into account the areas of material strengthening. The dependence of the change in magnitude of deformation occurring after jump-like increments in deformation caused by the destruction of dispersed phases in this alloy was revealed. A method of taking into account the revealed regularities in predicting the general deformation of AMg6 alloy based on the histogram of distribution of dispersed particles in the material is proposed.

Key words: mechanical characteristics, aluminium alloys, jump-like deformation, deformation diagram.

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.033

Received 27.02.2023

Formulation of the problem. AMg6 alloy, due to its low specific mass and high resistance to destruction under static, cyclic and dynamic loads, good corrosion resistance and manufacturability, successfully competes with steels, titanium and its alloys. It is widely used in aircraft and shipbuilding for the production of load-bearing structures, parts and hardware. Therefore, the study of the mechanical properties of this material, namely deformation diagrams, is relevant.

Analysis of available research. A number of structural materials are characterized by a jump-like nature of deformation growth [1, 2, 3]. One of such materials is aluminium alloy AMg6. Previous studies [4, 5] showed that the plastic deformation of the AMg6 alloy is accompanied by jump-like increments. The jump-like deformation of AMg6 alloy under conditions of uniaxial tension is described in [6], where the author indicated the possibility of connection of this process with the size and distribution of dispersed phases in this material. The total deformation of jumps exceeds all other deformation by 5–10 times. The creation of a model for predicting jump-like deformation under conditions of static and time-varying load makes it possible to improve the existing calculations of structural elements made of AMg6 alloy. Studies of microstructure of AMg6 alloy cited in [6, 7] revealed the presence of dispersoids in the matrix, stretched in the direction of rolling, which are destroyed during plastic deformation of the material. Thus, the AMg6 alloy at the micro level can be considered as a composite material [8], where the role of fibers is played by dispersoids stretched in the direction of rolling.

Objective of the research. This paper aims to identify the deformation patterns of AMg6 alloy under conditions of uniaxial tension in the regions of jump strain hardening and to apply these patterns in the model for predicting the deformation diagram based on the histogram of dispersoids distribution of in the alloy matrix.

Statement of the problem. In the research, the change in the nature of deformation in the areas of stress increase between instantaneous increases in deformation is analyzed. It is suggested to use the obtained dependencies in the method of predicting the general deformation of AMg6 alloy.

The mechanical characteristics of smooth cylindrical aluminium alloy AMg6 specimens were studied on the STM-100 servo-hydraulic machine at the temperature of 293 K [4]. The tension was carried out at the rate of increase of conditional static stress $\dot{\sigma} \approx 1.6$ MPa/s.

Tensile deformation of AMg6 alloy under mild loading conditions is accompanied by intermittent flow (jump-like deformation), which is recorded graphically in the form of «steps» on the deformation diagram $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ (Fig. 1).

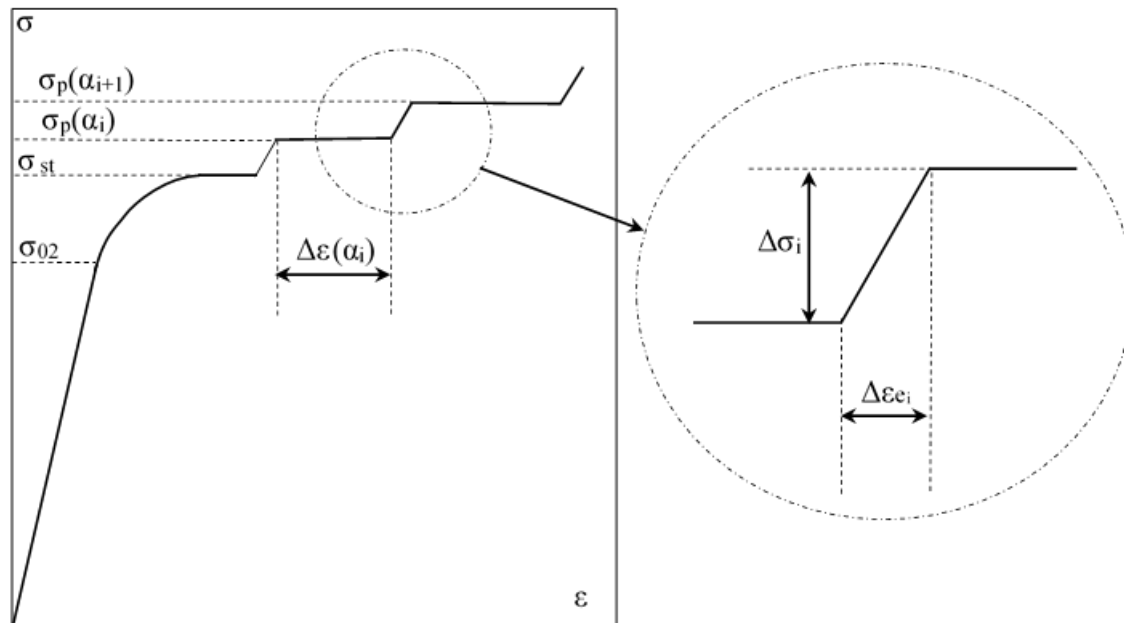


Figure 1. Diagram of deformation of AMg6 alloy under quasi-static tension in the mild type loading conditions

As the stress $\sigma_p(\alpha_i)$ increases, the jump deformation (the width of the “step” on the tensile diagram) increases. The area of jump-like increase in deformations under a mild type of loading is characterized by: the stress at the beginning of the jump process σ_{st} , the increase in stress between jumps $\Delta\sigma_i$, the proportionality coefficients in these areas E'_i and the deformation of the jump $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ under the corresponding stress $\sigma_p(\alpha_i)$. The symbol i defines the class of dispersoids that are destroyed in the process of elastic deformation of the matrix.

Aluminum alloy AMg6 can be considered as a composite material with a viscous base and brittle inclusions [9, 10]. Then the dispersoids in the AMg6 alloy play the role of obstacles in the way of dislocations and contribute to the accumulation of dislocation cloud around them. At the appropriate value of the load parameter, brittle inclusions are destroyed and the accumulated dislocation cloud is dispersed. The process of cracking of dispersoids and dispersal of the dislocation cloud is accompanied by a corresponding increase in plastic deformation – a deformation breakdown, which is accompanied at the micro level by the intensification of deformation in the sliding planes and (or) the initiation of sliding along new systems. When dispersoids of the same size are destroyed in the material, an instantaneous increase in plastic deformation occurs, which depends on the number of destroyed dispersoids $n(\alpha_i)$ and the mechanical characteristics of the material.

The entire tensile process within the limits of σ_{st} is an alternation of linear sections and instantaneous increments of deformation, i.e., an alternation of material strengthening and weakening processes. The relationship between the amount of instantaneous deformation increments and the corresponding maximum tensile stress was described in the article [6] (Fig. 2).

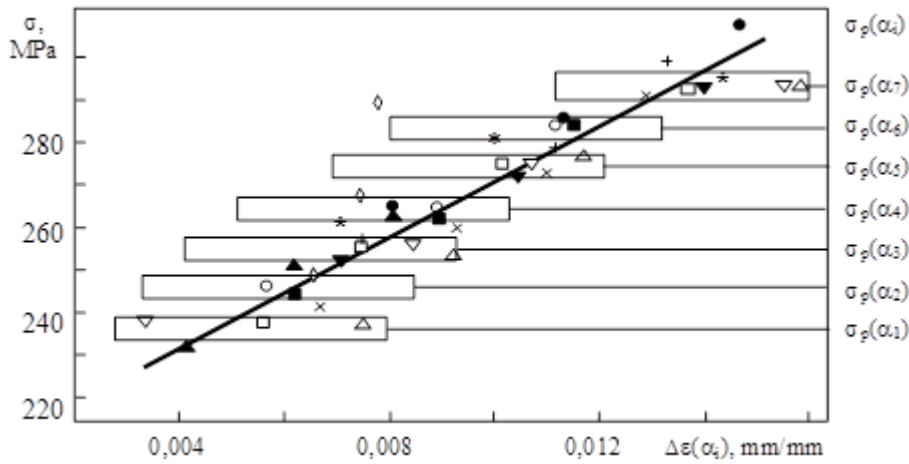


Figure 2. Dependence of the value of instantaneous strain increments on the stress level during stretching of AMg6 alloy specimens. Different symbols correspond to 12 specimens tested under the same conditions

According to the results of the experimental studies, the change in deformation parameters in the areas of material strengthening was analyzed, namely, the coefficient of proportionality between the deformation $\Delta\epsilon_i$ and the stress $\Delta\sigma_i$ in the strengthening area E'_i .

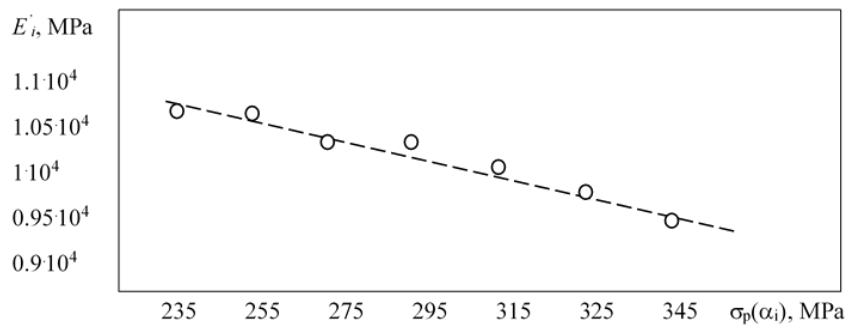


Figure 3. Dependence of the proportionality coefficient on the value of the fracture stress of inclusions $\sigma_p(\alpha_i)$

On the deformation diagram, these sections are characterized by a linear dependence and the parameters can be determined according to the formula:

$$E'_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\epsilon_i}. \tag{1}$$

Changes in the coefficient E'_i depending on the stress value $\sigma_p(\alpha_i)$ tends to decrease. This is accompanied by an increase in deformation $\Delta\epsilon_i$ until the next instantaneous increase in the deformation. Dependence of E'_i on the value of inclusion fracture stress $\sigma_p(\alpha_i)$ is revealed by the following formula:

$$E'_i(\sigma_p(\alpha_i)) = K + L \cdot \sigma_p(\alpha_i), \text{ where } K=1,26 \cdot 10^4; L=-9,1. \tag{2}$$

Under the conditions of uniaxial tension of the material at the controlled stress, the total deformation of AMg6 alloy consists of the elastic component ε_{el} , plastic deformation ε_{pl} to the stress of the beginning of the jump-like deformation σ_{st} , instantaneous $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ and linear $\Delta\varepsilon_i$ strain increments on the stepped section of the deformation diagram in conditions of mild loading type.

The dependence of the elastic strain on the yield strength can be described by Hooke's law:

$$\varepsilon_{el}(\sigma) = \frac{\sigma}{E}. \quad (3)$$

Respectively, after the stress σ_{02} , the total elastic deformation subject to Hooke's law:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_{02}}{E}, \quad (4)$$

On the area of elastic-plastic deformation up to σ_{st} , the growth of plastic deformation is satisfactorily described by a power law:

$$\varepsilon_n(\sigma) = C \cdot (\sigma - \sigma_{02})^{n_e}, \quad (5)$$

where C , n_e are the constants of the material.

Accordingly, after stress σ_{st} , the increase in plastic deformation before the start of jump-like deformation is:

$$\varepsilon_n = C \cdot (\sigma_{st} - \sigma_{02})^{n_e}, \quad (6)$$

where C , n_e are the constants of the material.

When the stress exceeds the value σ_{st} , jump-like increases in deformation $\Delta\varepsilon(\alpha_i)$ occur, which can be determined by machine learning methods [11, 12] depending on α_i [13, 14, 15].

Between the jumps, the deformation increases $\Delta\varepsilon_i$ according to formula (1) taking into account the dependence (2) of the proportionality coefficient $E_i(\sigma_p(\alpha_i))$ is:

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\Delta\sigma_i}{K + L \cdot \sigma_p(\alpha_i)}. \quad (7)$$

Thus, in accordance with dependencies (1)–(5), under uniaxial tension, the deformation at $\sigma > \sigma_{st}$ occurs according to the formula:

$$\varepsilon(\sigma) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_n + \Delta\varepsilon(\alpha_i) + \Delta\varepsilon_i. \quad (8)$$

The characteristics and constants used in formulas (1)–(7) for the AMg6 alloy at a temperature of $T=293$ K are given in the table.

Table

Characteristics and constants used for calculation of tensile strain of AMg6 alloy

E, MPa	σ_{02} , MPa	σ_{st} , MPa	$C, (MPa)^{-n_e}$	n_e	K	L
$0.74 \cdot 10^5$	175	235	$2.9 \cdot 10^{-12}$	4.2	$1.26 \cdot 10^4$	-9.1

Conclusions. The regularities of the course of jump-like deformation in the strengthening sections under the conditions of uniaxial tension of AMg6 alloy at the mild type of loading are revealed. The calculation dependence of the amount of deformation increases on the size parameter of disintegrating dispersed phases was obtained. A method for calculating the jump deformation of the AMg6 alloy at $T=293$ K based on the use of the histogram of the distribution of dispersoids of the material in its initial state is proposed.

References

1. Strizhalo V. A., Vorobev E. V., 1999. Standardization of the strength of metals under conditions of low-temperature instability of plastic deformation and the action of strong magnetic fields. *Strength of material* 31, 459–466. <https://doi.org/10.1007/BF02511164>
2. Vorobiov Ie., Anpilohova T. Nyzkotemperaturna strybkopodibna deformatsiia metaliv: lokalizovane poskodzhennia ta vtrata mitsnosti. *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2013. No. 3. P. 113–123. [In Ukrainian].
3. Hryhorova T. V., Shumilin S. E., Shapovalov Yu. O., Semerenko Yu. O., Tabachnikova O. D., Tykhonovskiy M. A., Tortika O. S., Tsekhetbauer M. I., Shafler E. Nyzkotemperaturni mekhanichni vlastyvyty vysokoentropiinoho splavu Fe40Mn40Co10Cr10, plastychnist yakoho indukovana dviinykuvanniam *Visnyk KhNU imeni V. N. Karazina, seriia "Fizyka"*. Vyp. 32. 2020. P. 41–48. [In Ukrainian].
4. Iasnii P., Halushchak M. Metodyka i deiaki rezultaty doslidzhennia vplyvu tsyklichnoho navantazhuvannia na diahramy deformuvannia splavu AMh-6. *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*. 1998. Tom 3. Chyso 4. P. 62–66. [In Ukrainian].
5. Stryzhalo V. A. Tsyklycheskaia prochnost y polzuchest metallov pry malotsyklovom nahruzhenyy v uslovyiakh nyzkykh y vysokyykh temperatur. K.: Nauk. dumka, 1978. 238 p. [In Russian].
6. Iasnii P. V., Hlado V. B. Vplyv tsyklichnoi roztiakhovoi skladovoi navantazhennia na dyslokatsiinu strukturu splavu Amh6. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2002. No. 3. P. 63–68. [In Ukrainian]
7. Yasnii P. V., Fedak S. I., Glado V. B., Galushchak M. P., 2004. Jumplike deformation in AMg6 aluminum alloy in tension. *Strength of Materials* 36. P. 113–118. <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000028300.06024.59>
8. Karpynos D. M., Tuchynskiy L. Y., Sapozhnykova A. B. y dr. *Kompozytsyonnye materyaly v tekhnike*. K.: Tekhnika, 1985. 152 p. [In Russian].
9. Fedak S., 2003. Jumplike deformation of the AMg6 alloy during creep. *Visn. Ternopil. Derzh. Tekhn. Univ.* 8. P. 16–23. [In Ukrainian].
10. Iasnii P. V., Halushchak M. P., Stoianova O. M., Fedak S. I. Mikrostrukturni osoblyvosti deformuvannia splavu AMh6 pry povzuchosti ta roztiahu. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2001. No. 5. P. 64–68. [In Ukrainian].
11. Smola A., Vishwanathan S. V. N., 2010. *Introduction to Machine Learning*, Cambridge University Press, P. 234.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., 2009. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. In: New York, Springer. P. 764. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
13. Yasnii O., Didych I., Fedak S., Lapusta Yu. Modeling of AMg6 aluminum alloy jump-like deformation properties by machine learning methods. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 28. 2020. P. 1392–1398. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.110>
14. Didych I., Yasnii O., Fedak S., Lapusta Yu. Prediction of jump-like creep using preliminary plastic strain. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 36. 2022. P. 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.019>
15. Yasnii O. P., Fedak S. I., Didych I. S. Modeliuvannia kharakterystyk pereryvchatoi tekuchosti splavu AMh6 neironnymy merezhamy. *Pratsi VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii „Poskodzhennia materialiv pid chas ekspluatatsii, metody yoho diahnostuvannia i prohnozuvannia“*, 24–27 veresnia 2019 r. T.: TNTU, 2019. P. 124–127. [In Ukrainian]

Список використаних джерел

1. Strizhalo V. A., Vorobev E. V., 1999. Standardization of the strength of metals under conditions of low-temperature instability of plastic deformation and the action of strong magnetic fields. Strength of material 31, 459–466. <https://doi.org/10.1007/BF02511164>
2. Воробйов С., Анпілогова Т. Низькотемпературна стрибкоподібна деформація металів: локалізоване пошкодження та втрата міцності. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2013. № 3. С. 113–123.
3. Григорова Т. В., Шумілін С. Е., Шаповалов Ю. О., Семеренко Ю. О., Табачнікова О. Д., Тихоновський М. А., Тортіка О. С., Цехетбауер М. І., Шафлер Е. Низькотемпературні механічні властивості високоентропійного сплаву Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀, пластичність якого індукована двійникуванням Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 32. 2020. С. 41–48
4. Ясній П., Галушак М. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг-6. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 1998. Том 3. Число 4. С. 62–66.
5. Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. К.: Наук. думка, 1978. 238 с.
6. Ясній П. В., Гладько В. Б. Влияние циклической розтягової складової навантаження на дислокаційну структуру сплаву АМг6. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2002. № 3. С. 63–68.
7. Yasniy P. V., Fedak S. I., Glad'ko V. B., Galushchak M. P., 2004. Jumplike deformation in AMg6 aluminum alloy in tension. Strength of Materials. 36. P. 113–118. <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000028300.06024.59>
8. Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Сапожникова А. Б. и др. Композиционные материалы в технике. К.: Техніка, 1985. 152 с.
9. Fedak S., 2003. Jumplike deformation of the AMg6 alloy during creep. Visn. Ternopil. Derzh. Tekhn. Univ. 8. P. 16–23. [In Ukrainian]
10. Ясній П. В., Галушак М. П., Стоянова О. М., Федак С. І. Мікроструктурні особливості деформування сплаву АМг6 при повзучості та розтягу. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2001. № 5. С. 64–68.
11. Smola A., Vishwanathan S.V.N., 2010. Introduction to Machine Learning, Cambridge University Press. P. 234.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., 2009. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. In: New York, Springer. P. 764. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
13. Yasniy O., Didych I., Fedak S., Lapusta Yu. Modeling of AMg6 aluminum alloy jump-like deformation properties by machine learning methods. Procedia Structural Integrity. Vol. 28. 2020. P. 1392–1398. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.110>
14. Didych I., Yasniy O., Fedak S., Lapusta Yu. Prediction of jump-like creep using preliminary plastic strain. Procedia Structural Integrity. Vol. 36. 2022. P. 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.019>
15. Ясній О. П., Федак С. І., Дідич І. С. Моделювання характеристик переривчастої текучості сплаву АМг6 нейронними мережами. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: праці VI міжнар. наук.-техніч. конф., м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р. Тернопіль, 2019. С. 124–127.

УДК 539.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ СПЛАВУ АМг6

Сергій Федак; Олег Ясній; Ірина Дідич; Надія Крива

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
Тернопіль, Україна*

Резюме. Мета роботи – виявлення закономірностей деформування сплаву АМг6 в умовах одновісного розтягу на ділянках зміцнення стрибкоподібної деформації. Оскільки алюмінієвий сплав АМг6 розглядається як композитний матеріал із в'язкою основою та крихкими включеннями, то використання цих закономірностей у моделях прогнозування діаграми деформації здійснюється на основі гістограми розподілу дисперсоїдів у матриці сплаву. Повна діаграма деформування сплаву АМг6 в умовах одновісного розтягу складається з ділянки пружної деформації до напруження σ_0 , наступної нелінійної ділянки до напруження σ_{cm} , а також почергових ділянок стрибкоподібної деформації та ділянок зміцнення. Найбільшу складність у моделюванні одновісного розтягу складає проміжок від σ_{cm} до руйнування. Добрі

результати в прогнозуванні деформації величини стрибка та напруження його ініціації дає використання методів машинного навчання. Для прогнозування повної деформації при досягненні напруження σ_{cm} необхідний аналіз ділянок зміцнення. На основі проведених експериментальних досліджень проведено аналіз зміни характеру деформації на ділянках приросту напружень між миттєвими приростами деформації. Виявлено залежність зміни величини деформації, що відбуваються після стрибкоподібних приростів деформації, спричинених руйнуванням дисперсних фаз у даному сплаві. Отримано розрахункову залежність величини приростів деформації від параметра розміру дисперсних фаз, що руйнуються в матриці матеріалу. Запропоновано враховувати ці зміни як лінійну залежність коефіцієнта пропорційності між деформацією та напруженням на ділянці зміцнення від розміру зруйнованих включень. Виявлені закономірності перебігу стрибкоподібної деформації на ділянках зміцнення в умовах одновісного розтягу сплаву АМгб за м'якого типу навантажування використано в запропонованій методиці розрахунку діаграми деформування на ділянках стрибкоподібної деформації сплаву АМгб при $T=293\text{ K}$, яка ґрунтується на використанні гістограми розподілу дисперсоїдів матеріалу в первісному стані. Ця методика може бути використана також для прогнозування стрибкоподібної деформації в умовах повзучості сплаву АМгб.

Ключові слова: механічні характеристики, алюмінієві сплави, стрибкоподібна деформація, діаграма деформування.

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.033

Отримано 27.02.2023