

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Fe-Ni В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

В.В. Миколаенко

Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики",
департамент прикладной математики
МИЭМ НИУ ВШЭ

Аннотация

Применение эффекта сверхпластичности при реализации процессов обработки материалов давлением позволяет осуществлять бездефектное формоизменение листовых заготовок для получения оболочечных деталей сложной геометрической формы. Данный эффект возникает в специальных и промышленных сплавах на основе титана и алюминия. При разработке новых сплавов, обладающих эффектом сверхпластичности, особое внимание уделяется их деформационному поведению при повышенных температурах. Модель, описывающая деформационное поведение материала при заданной температуре, связывает напряжение течения со скоростью и степенью деформации и содержит, как правило, большое количество параметров, определяемых на основе экспериментальных данных. В работе представлен способ построения модели деформационного поведения материала по результатам испытаний на одноосное растяжение образцов с постоянными скоростями деформации на примере экспериментального сплава на основе алюминия.

Введение

Современные технологии сверхпластической газовой формовки позволяют получить тонкостенные изделия сложной геометрической формы [1,2]. При проектировании таких процессов необходимо разрабатывать режим давления, учитывающий особенности деформационного поведения формируемого сплава [1–4]. Деформационное поведение сверхпластических материалов исследуется с помощью механических испытаний на растяжение плоских образцов [5–8] или технологических экспериментов по формовке листовых образцов [9–11].

Наиболее распространенным способом исследования деформационного поведения являются механические испытания на растяжение плоских образцов, поскольку они позволяют получить зависимости напряжения от деформации при различных постоянных скоростях деформации. Создание деформационной модели заключается в построении соотношений, аппроксимирующих данные зависимости [12–15]. Сложности, связанные с построением таких моделей, обусловлены, в первую очередь, большим количеством входящих в них констант материала, выбор которых должен обеспечивать согласование экспериментальных данных с результатами модели.

В данной работе осуществляется построение модели деформационного поведения экспериментального сплава системы Al-Mg-Fe-Ni [16], демонстрирующего высокоскоростную сверхпластичность. Кривые зависимости напряжения от деформации при постоянных скоростях деформации получены с помощью испытаний на растяжение. Предложен подход, позволяющий сократить количество параметров, по сравнению с используемыми в [15,17,18], и уменьшить отклонения между экспериментальными данными и моделью.

Модель деформационного поведения

Деформационное поведение материалов, подвергаемых сверхпластической деформации, может быть представлено в виде:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (1)$$

где σ – напряжение, ε – деформация, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации. Для построения функции $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ используется модель уравнения состояния деформируемой среды [18]:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^n, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(b\sigma), \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_3 (\sinh(a\sigma))^\gamma, \quad (4)$$

где $A_1, A_2, A_3, b, n, \gamma, a$ – константы материала, зависящие от деформации ε .

Для каждого значения деформации выполняется следующая процедура: сначала с помощью линейной регрессии определяется n из уравнения (2):

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n \ln \sigma \Rightarrow n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \sigma} \right]_T. \quad (5)$$

Далее с помощью линейной регрессии определяется b из уравнения (3):

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + b\sigma \Rightarrow b = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma} \right]_T. \quad (6)$$

После чего a из уравнения (4) определяется как $a = \frac{b}{n}$, а остальные константы из этого уравнения вычисляются с помощью линейной регрессии:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_3 + \gamma \ln \sinh(a\sigma) \Rightarrow \gamma = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma} \right]_T, \quad \beta = \ln A_3. \quad (7)$$

Константы, входящие в уравнение (7), вычисляются для дискретного набора значений деформации ε_i : $a_i = a(\varepsilon_i)$, $\beta_i = \beta(\varepsilon_i)$ и $\gamma_i = \gamma(\varepsilon_i)$. Чтобы получить непрерывную модель, полученные значения a_i , β_i и γ_i аппроксимируются полиномом пятой степени:

$$\alpha(\varepsilon) = K_1 + K_2\varepsilon + K_3\varepsilon^2 + K_4\varepsilon^3 + K_5\varepsilon^4 + K_6\varepsilon^5$$
$$\beta(\varepsilon) = K_7 + K_8\varepsilon + K_9\varepsilon^2 + K_{10}\varepsilon^3 + K_{11}\varepsilon^4 + K_{12}\varepsilon^5. \quad (8)$$

$$\gamma(\varepsilon) = K_{13} + K_{14}\varepsilon + K_{15}\varepsilon^2 + K_{16}\varepsilon^3 + K_{17}\varepsilon^4 + K_{18}\varepsilon^5$$

Уравнение модели, описывающей деформационное поведение материала, строится следующим образом:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\exp(\beta(\varepsilon))} \right)^{\frac{1}{\gamma(\varepsilon)}} + \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\exp(\beta(\varepsilon))} \right)^{\frac{2}{\gamma(\varepsilon)}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (9)$$

Проблема такого подхода заключается в том, что значение α , найденное как отношение b к n , может не обеспечивать минимума отклонения построенной аппроксимации от экспериментальных данных. Для каждого значения (ε_i) это отклонение может быть охарактеризовано следующей функцией квадратичной ошибки:

$$F_i(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) = \sum_j (\sigma_{i,j} - \sigma(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \varepsilon_j, \dot{\varepsilon}_j))^2, \quad (10)$$

где $\sigma_{i,j}$ – экспериментально найденное значение напряжения, соответствующее степени деформации ε_i и скорости деформации $\dot{\varepsilon}_j$.

Для решения данной проблемы после вычисления $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ предлагается скорректировать их посредством минимизации функции (10) методом Нелдера-Мида. Опираясь на характер скорректированных значений $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$, следует построить аппроксимации $\alpha(\varepsilon)$, $\beta(\varepsilon)$ и $\gamma(\varepsilon)$. При этом аппроксимации предлагается производить последовательно, корректируя значения оставшихся констант посредством минимизации функции (10). Полученные в результате зависимости α , β , и γ от ε будут включать набор констант K_1, \dots, K_n , которые окончательно корректируются посредством минимизации совокупного квадратичного отклонения:

$$F(K_1, \dots, K_n) = \sum_i F_i. \quad (11)$$

Обработка экспериментальных данных

В данной работе было проведено исследование свойств экспериментального сплава системы Al-Mg-Fe-Ni. Геометрические параметры образца и установки, реализующей испытание на растяжение, представлены на рис. 1.

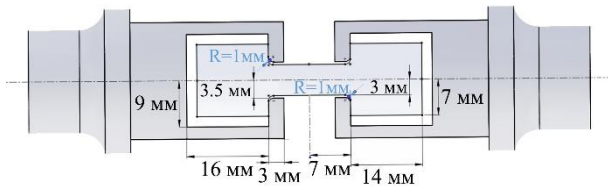


Рис. 1 Исходная геометрия

Было проведено 5 испытаний на растяжение образца со следующими постоянными скоростями деформации $\dot{\epsilon}$: 0.06, 0.03, 0.01, 0.005 и 0.002 s^{-1} .

На рисунке 2 проиллюстрировано сравнение экспериментальных данных (пунктирной линией) с моделью (сплошной линией), полученной с помощью подхода, описанного в [17,18].

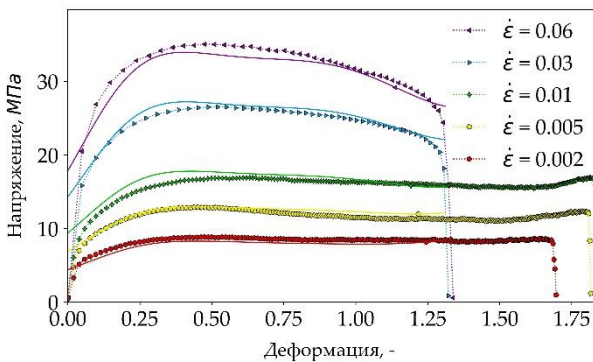


Рис. 2 Сравнение экспериментальных данных с моделью, полученной из общепринятого подхода

Среднее отклонение найденной модели от экспериментальных данных оценивается с помощью функции из уравнения (12), что в данном случае соответствует значению 394.96... Н/мм².

$$D = \sum_{i,j} |\sigma_{i,j} - \sigma(\epsilon_{i,j}, \dot{\epsilon}_j)|. \quad (12)$$

На рисунке 3 приведено сравнение кривых, полученных с помощью полиномиальной аппроксимации значений α_i , β_i и γ_i , найденных посредством минимизации функции (10). Сами значения α_i , β_i и γ_i представлены на рисунках 4-6. Маркерами, помеченными как «Линейная регрессия», представлены зависимости, найденные с помощью подхода, описанного в [17,18]. Маркерами, помеченными как «1 этап», представлены значения, полученные путем минимизации функции (10). Можно видеть, что в данном случае наблюдается значительное отклонение модели от экспериментальных данных. Это объясняется существенным разбросом значений α_i , β_i , и γ_i , значительно снижающим качество полиномиальной аппроксимации.

С целью уменьшения ошибки аппроксимация зависимостей $\alpha(\epsilon)$, $\beta(\epsilon)$ и $\gamma(\epsilon)$ производилась последовательно. Сначала была выполнена аппроксимация зависимости $\beta(\epsilon)$, имеющей наибольший разброс. Как видно из рисунка 4, для описания данной зависимости оказалось достаточным использовать линейную функцию.

После построения аппроксимации $\beta(\epsilon)$ был выполнен второй этап оптимизации, на котором при поиске минимума функции (10) варьировались только значения α_i и γ_i . Полученные значения

проиллюстрированы на рисунках 5 и 6 маркерами, отмеченными как «2 этап». После чего производилась аппроксимация зависимости $\alpha(\epsilon)$, для которой была выбрана экспоненциальная функция. Результаты аппроксимации представлены на рисунке 5.

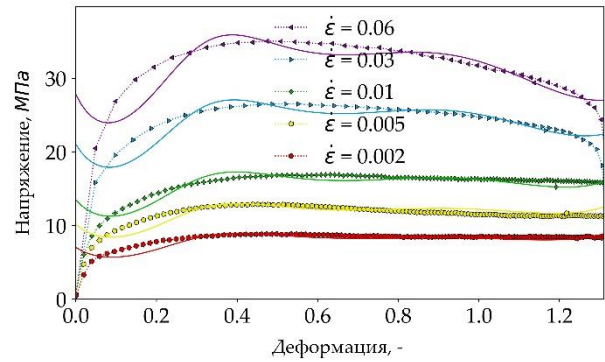


Рис. 3 Сравнение экспериментальных данных с моделью, полученной после 1 этапа оптимизации

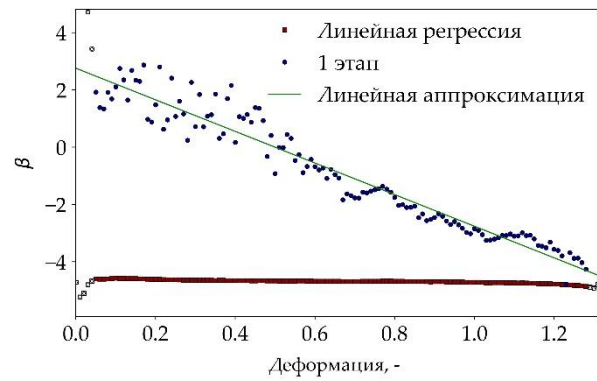


Рис. 4 $\beta(\epsilon)$ в сравнении с результатами линейной регрессии и 1 этапом оптимизации

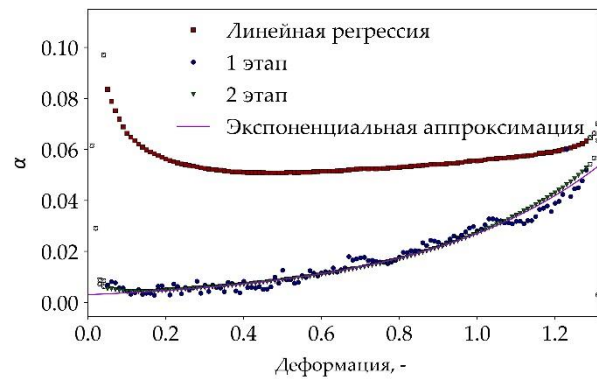


Рис. 5 $\alpha(\epsilon)$ в сравнении с результатами линейной регрессии, 1 и 2 этапом оптимизации

Аналогичным образом был выполнен третий этап оптимизации, на котором варьировались только значения γ_i , в то время как значения α_i и β_i рассчитывались с помощью аппроксимаций, построенных на предыдущих этапах оптимизации. Полученные значения представлены на рисунке 6 маркерами, обозначенными как «3 этап». Для их аппроксимации был использован полином пятой степени.

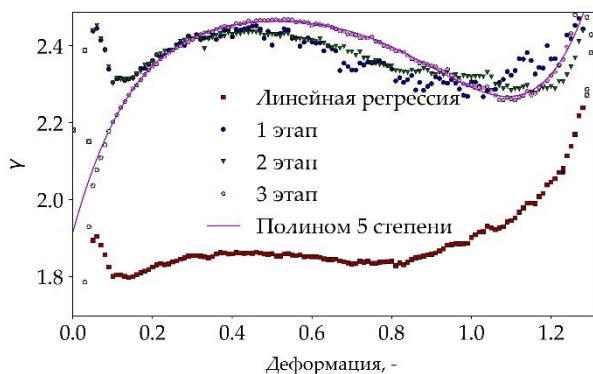


Рис. 6 $\gamma(\varepsilon)$ в сравнении с результатами линейной регрессии, 1, 2 и 3 этапом оптимизации

Построенная модель материала состоит из уравнения (9) и соотношений, описывающих зависимости α , β , и γ от ε :

$$\begin{aligned} \alpha(\varepsilon) &= K_1 + K_2\varepsilon \\ \beta(\varepsilon) &= K_3 \exp(K_4\varepsilon) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\gamma(\varepsilon) = K_5 + K_6\varepsilon + K_7\varepsilon^2 + K_8\varepsilon^3 + K_9\varepsilon^4 + K_{10}\varepsilon^5$$

Данная модель содержит 10 параметров.

Представленный выше алгоритм их определения позволяет получить хорошее начальное приближение для последующей процедуры многомерной оптимизации функции (11). Окончательный результат представлен на рисунке 7, демонстрирующем сравнение построенной модели с экспериментальными данными. Среднее отклонение, полученное на финальном этапе, составило 145.67... Н/мм².

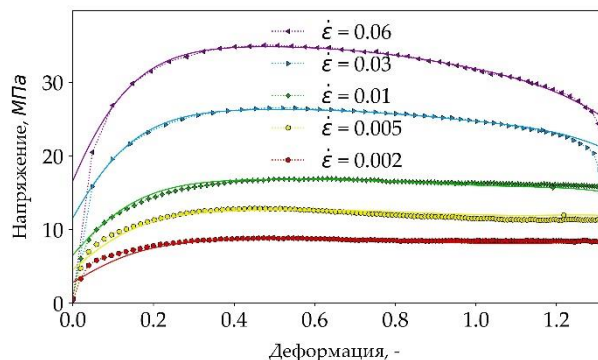


Рис. 7 Сравнение экспериментальных данных с усовершенствованной моделью

Заключение

В данной работе продемонстрирован способ получения модели, описывающей деформационное поведение материала, подвергаемого деформации в условиях сверхпластичности. Применение данного способа к результатам испытаний экспериментального алюминиевого сплава системы Al-Mg-Fe-Ni позволило сократить количество параметров модели с 18 до 10, одновременно получив лучшее качественное сходство построенных аппроксимаций с экспериментальными данными и более чем двукратное уменьшение абсолютного отклонения.

Работа выполнена под руководством С.А.Аксенова в рамках проекта РНФ No. 2020ZDLGY01-05.

Список литературы:

- 1 Langdon T. G. The mechanical properties of superplastic materials. - 1982. - *Metal. Trans. A*.
- 2 Sherby O. D., Wadsworth J. Superplasticity-Recent advances and future directions. - 1989. - *Prog. Mater. Sci.*
- 3 Aksenov S. A., Kolesnikov A. V., Mikhaylovskaya A. V. Design of a gas forming technology using the material constants obtained by tensile and free bulging testing. - 2016. - *J. Mater. Process. Technol.* - № 237.
- 4 Jarrar F., Sorgente D., Aksenov S., Enikeev F. On the challenges and prospects of the superplastic forming process. - 2018. *Materials Science Forum*
- 5 Comley P. N. ASTM E2448—A Unified Test for Determining SPF Properties. - 2008. - *J. Mater. Eng. Perform.* - № 17. - с. 183–6.
- 6 Alabort E., Putman D., Reed R. C. Superplasticity in Ti–6Al–4V: Characterisation, modelling and applications. - 2015. - *Acta Mater.* - № 95. - с. 428–42.
- 7 Yasmeen T., Shao Z., Zhao L., Gao P., Lin J., Jiang J. Constitutive modeling for the simulation of the superplastic forming of TA15 titanium alloy. - 2019. - *Int. J. Mech. Sci.*
- 8 Yang J., Wu J., Zhang Q., Han R., Wang K. Investigation of flow behavior and microstructure of Ti–6Al–4V with annealing treatment during superplastic forming. - 2020. - *Mater. Sci. Eng. A*.
- 9 Enikeev F. U., Kruglov A. A. An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm. - 1995. - *Int. J. Mech. Sci.*
- 10 Giuliano G., Franchitti S. On the evaluation of superplastic characteristics using the finite element method. - 2007. - *Int. J. Mach. Tools Manuf.*
- 11 Aksenov S., Sorgente D. Determination of biaxial stress–strain curves for superplastic materials by means of bulge forming tests at constant stress. - 2020. - *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* - № 31. - с. 618–27.
- 12 Sellars C. M., McTegart W. J. On the mechanism of hot deformation. - 1966. - *Acta Metall.*
- 13 Zener C., Hollomon J. H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel. - 1944. - *J. Appl. Phys.*
- 14 Mosleh A. O., Mikhaylovskaya A. V., Kotov A. D., Kwame J. S. Experimental, modelling and simulation of an approach for optimizing the superplastic forming of Ti–6%Al–4%V titanium alloy. - 2019. - *J. Manuf. Process.*
- 15 Mosleh A., Mikhaylovskaya A., Kotov A., Pourcelot T., Aksenov S., Kwame J., Portnoy V. Modelling of the superplastic deformation of the near- α titanium alloy (Ti–2.5Al–1.8Mn) using arrhenius-type constitutive model and artificial neural network. - 2017. - *Metals (Basel)*.
- 16 Kishchik A. A., Mikhaylovskaya A. V., Kotov A. D., Rofman O. V., Portnoy V. K. Al–Mg–Fe–Ni based alloy for high strain rate superplastic forming. - 2018. - *Mater. Sci. Eng. A* - № 718. - с. 190–7.
- 17 Mosleh A. O., Mikhaylovskaya A. V., Kotov A. D., Kwame J. S., Aksenov S. A. Superplasticity of Ti–6Al–4V titanium alloy: Microstructure evolution and constitutive modelling. - 2019. - *Materials (Basel)*. - № 12.
- 18 Mosleh A. O., Mikhaylovskaya A. V., Kotov A. D., Portnoy V. K. Arrhenius-type constitutive equation model of superplastic deformation behaviour of titanium-based alloys. - 2018. *Defect and Diffusion Forum*