

МАТЕРИАЛ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Предложено моделировать процессы сверхпластической деформации на оптически прозрачных материалах, созданных на основе диеновых и винилароматических углеводородов, полярного пластификатора и неокрашивающего стабилизатора. Показано, что коэффициент скоростного упрочнения таких материалов может изменяться от 0,2 до 1,0 в интервалах скоростей сверхпластической деформации.

ВСТУПЛЕНИЕ

Состояние сверхпластичности металлов (СПМ) впервые наблюдал еще в 1912 году Bengough [1, 2], достигший удлинения 160 % в процессе растяжения бронзового образца при 700 °С. Спустя столетие СПМ из объекта экзотических исследований превратилось в эффективную основу для создания новых материалов и технологий обработки давлением, обеспечивающих уникальные свойства изготавливаемых деталей и высокую технико-экономическую эффективность производственных процессов.

Проектирование новых технологий сверхпластической деформации предусматривает моделирование основных операций обработки материалов путем: 1) изготовления опытных партий в производственных условиях; 2) компьютерного моделирования, 3) моделирования техпроцессов с использованием специальных материалов. Первый вариант дает наиболее точные результаты, однако обуславливает высокие трудозатраты, которые не всегда экономически обоснованы. Второй вариант не предусматривает материальные затраты, но во многом зависит от субъективных мнений составителей компьютерных программ, использующих по своему усмотрению набор тех или иных моделей деформации, методов проведения расчетов и используемых формул. Третий вариант является упрощенной разновидностью первого и предполагает существенное снижение трудозатрат за счет выбора специальных модельных материалов, которые либо относительно дешевы, либо упрощают технологию моделирования и повышают ее эффективность.

В настоящее время превалирует второй вариант моделирования, хотя компьютерные методы расчетов процессов деформации все чаще подвергаются серьезной критике [3]. В связи с этим актуальны поиски новых модельных материалов как альтернативы первым двум вариантам моделирования.

По устоявшемуся мнению многих исследователей [2, 4, 5] наилучшим материалом для моделирования процессов сверхпластической деформации является эвтектический сплав $Sn-38\%Pb$. Выбор этого сплава обусловлен следующими факторами:

- простота формирования ультрамелкозернистой сверхпластичной структуры в сплаве (интенсивная деформация после желательной быстрой рекристаллизации расплава);
- высокая чувствительность напряжения течения к скорости деформации, определяемая, обычно, по величине коэффициента скоростного упрочнения $m = d(\ln\sigma) / d(\ln\dot{\xi})$ (σ – напряжение течения, $\dot{\xi}$ – скорость деформации);
- низкие напряжения течения и большие предельные степени деформации сплава;
- диапазон оптимальных температур сверхпластичности эвтектики $Sn-38\%Pb$ включает и комнатную температуру, что устраняет проблемы, связанные с нагревом образцов.

Однако в литературе нигде не упомянут тот факт, что после интенсивной деформации заготовки из сплава $Sn-38\%Pb$ необходимо хранить в морозильнике во избежание роста зерен, происходящего в сплаве при комнатной температуре. Деформирование сплава в оптически прозрачном инструменте (например, в прозрачной матрице при сверхпластической формовке) позволяет наблюдать в динамике изменение деформированного состояния заготовки, но это касается только ее поверхности, если на нее нанесена координатная сетка. Деформацию внутренних слоев сплава можно изучать лишь после прекращения самого процесса деформации и последующего разделения заготовки.

Цель статьи – определить возможность и степень эффективности использования в качестве материалов для моделирования сверхпластической деформации оптически прозрачных полимеров,

подобных синтетическому каучуку.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для достижения поставленной цели необходим материал, который, кроме преимуществ эвтектики $Sn-38\%Pb$, обладает стабильными во времени физико-механическими свойствами при комнатной температуре и позволяет наблюдать деформацию как поверхностных, так и внутренних слоев заготовки, то есть быть оптически прозрачным.

Практически всем этим условиям удовлетворяли блок-сополимеры на основе диеновых и винилароматических углеводородов [6]. Для моделирования прессования были изготовлены составные по диаметральному сечению образцы размерами $\varnothing 20 \times 30$ мм из нелинейно-вязкого материала состава полибутадиен - 25% полистирол. На плоскости разъема тушью наносили прямоугольную координатную сетку, после чего заготовку помещали в оптически прозрачный штамповый инструмент и прикладывали к ней деформирующую нагрузку.

Характер течения материала и искажение координатной сетки в процессе деформирования фиксировали на видеокамеру на всем протяжении формоизменения. В отличие от моделирования на сплаве $Sn-38\%Pb$ в нашем случае, кроме данных по деформации координатной сетки удалось построить кинематические картины процесса прессования по линиям тока, то есть увеличить объем и качество получаемой информации.

Моделирование других процессов ОМД [6] показало, что целесообразно в блок-сополимеры добавить небольшое количество полярного пластификатора и неокрашивающего стабилизатора. В связи с этим для моделирования сверхпластической деформации был разработан ряд составов нелинейно-вязких полимерных композиций, содержание компонентов которых приведено в табл.1. Блок-сополимеры с неокрашивающим стабилизатором вальцевали при $70-75^\circ C$ в течение 2 минут до образования эластичной ленты, затем вводили полярный пластификатор (дибутилфталат или дибутилсебагинат). Смесь перемешивали в вальцах путем частичной срезки ее с валков. Образцы для испытаний прессовали на гидропрессе при температуре плит $150^\circ C$ и давлении 7,5 МПа, после чего охлаждали под давлением до температуры $30^\circ C$.

Таблица 1 – Состав нелинейно-вязких полимерных композиций

| Компоненты | Содержание компонентов, мас.ч. в вариантах композиции | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Бутадиенстирольный блок-сополимер | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - |
| Изопренстирольный блок-сополимер | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | - |
| Бутадиен- α -метилстирольный блок-сополимер | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Дибутилфталат | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | - | - | - | - | - | - | 20 | 30 |
| Дибутилсебагинат | - | - | - | - | - | - | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | - | - |

Физико-механические испытания образцов проводили в соответствии с ГОСТ 269, 270 для резин, коэффициент m определяли методом релаксации напряжений [4] на образцах с размерами $\varnothing 20 \times 30$ мм. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2 показывает, что чувствительность напряжения течения к скорости деформации предлагаемых материалов для моделирования может варьироваться в широких пределах, в первую очередь, за счет небольших добавок пластификаторов. Ввод и изменение содержания пластификатора в композиции вызывает уменьшение условной прочности при растяжении (упрощение условий моделирования) в сравнении с материалами без пластификаторов, меняются также деформационные характеристики композиций, однако относительное удлинение до разрыва остается стабильно высоким.

Кроме этого, изменение параметра m можно достичь за счет выбора того или иного блок-сополимера. Вместе с тем, содержание пластификатора не должно составлять более, чем 40 % от массовой части блок-сополимера, поскольку, во-первых, сверхпластичных металлов и сплавов с коэффициентом $m = 1$ практически не существует, а во-вторых, материал размягчается и плохо держит форму.

Таблица 2 – Физико-механические свойства полимерных композиций

| Показатель | Вариант композиции | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Условная прочность при растяжении, МПа | 6,5 | 2,9 | 1,12 | 0,45 | 0,31 | 0,14 | 4,17 | 1,82 | 0,84 | 0,38 | 0,20 | 0,1 | 0,19 | 0,42 |
| Относительное удлинение до разрыва, % | 615 | 502 | 463 | 268 | 214 | 145 | 635 | 560 | 490 | 312 | 215 | 167 | 392 | 309 |
| Относительная остаточная деформация после разрыва, % | 18 | 24 | 52 | 37 | 26 | 18 | 22 | 29 | 56 | 47 | 32 | 21 | 41 | 27 |
| Пластичность по Карреру | 0,29 | 0,51 | 0,59 | 0,64 | 0,72 | 0,90 | 0,34 | 0,54 | 0,63 | 0,70 | 0,77 | 0,92 | 0,68 | 0,60 |
| Коэффициент скоростной чувствительности m при скоростях деформации 10^{-3} - 10^{-4} с $^{-1}$ | 0,29 | 0,37 | 0,42 | 0,51 | 0,56 | 1,0 | 0,26 | 0,39 | 0,52 | 0,72 | 1,0 | 1,0 | 0,49 | 0,61 |

Представленные в табл. 1 композиции были использованы для изготовления заготовок и дальнейшего моделирования процесса осадки металла в состоянии сверхпластичности. Составную заготовку отливали в матрицу по частям, по плоскости разъема тушью наносили прямоугольную координатную сетку. При моделировании процесса осадки подготовленные заготовки вместе с инструментом опускали в оптически прозрачную прямоугольную ванну, наполненную водой для устранения оптических искажений, возникающих в результате изменения кривизны поверхности заготовок. Проведенные эксперименты позволили, в частности, построить в логарифмических координатах графики $\sigma = f(\dot{\zeta})$ и определить коэффициент m по тангенсу угла наклона графиков к оси $\dot{\zeta}$ (рис. 1).

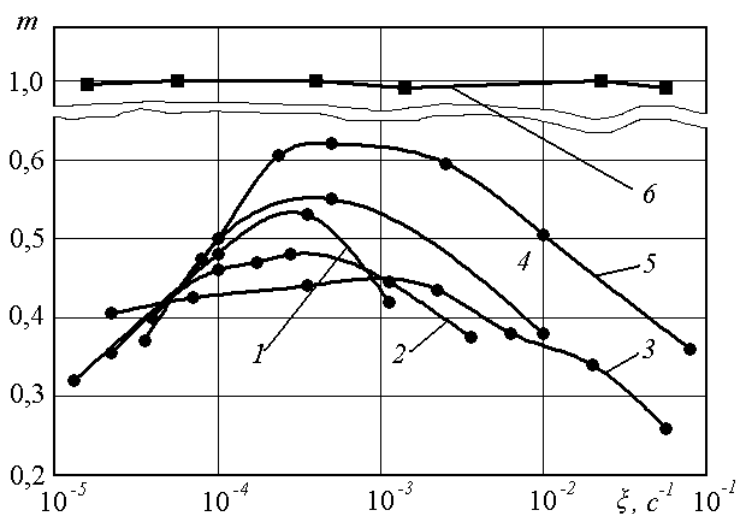


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента скоростного упрочнения от скорости деформации при осадке оптически прозрачных блок-сополимеров с содержанием компонентов согласно табл. 1

Анализ результатов, представленных на рис. 1, показывает, что так же, как и для сверхпластичных металлов и сплавов, деформирование образцов из блок-сополимеров характеризуется высокой скоростной чувствительностью напряжения течения, коэффициент скоростного упрочнения m имеет максимум в том же диапазоне скоростей деформации, что и для металлических материалов.

Незначительное изменение содержания пластификатора позволяет моделировать либо поведение сплава с той или иной сверхпластичной структурой, либо те или иные температурные условия деформирования.

ВЫВОДЫ

1. Моделирование процессов сверхпластической деформации с помощью оптически прозрачных, нелинейно-вязких блок-сополимеров на основе диеновых и винилароматических углеводородов, полярного пластификатора и неокрашивающего стабилизатора позволяет наглядно наблюдать процесс формоизменения на всем протяжении деформирования образцов.

2. С помощью координатной сетки, нанесенной на диаметрально плоскость таких образцов, и видеосъемки процесса деформации можно проводить анализ качественных и количественных изменений по всему объему образцов в любой промежуток времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giuliano G. Superplastic forming of advanced metallic materials / G. Giuliano. – Oxford : Woodhead Publishing Limited, 2011. – 377 p.

2. Васин Р. А. Введение в механику сверхпластичности. Часть 1 / Р. А. Васин, Ф. У. Еникеев. – Уфа : ГИЛЕМ, 1998. – 280 с.

3. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением : в 2 т. Т. 1 / А. Л. Воронцов. – М. : МГТУ им. Баумана, 2014. – 396 с.

4. Рудской А. И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов / А. И. Рудской, Я. И. Рудаев. – СПб. : Наука, 2009. – 218 с.

5. Коршак В. Ф. Структурно-фазовая релаксация в сверхпластичном эвтектическом сплаве Sn-38 % вес. Pb / В. Ф. Коршак, Ю. А. Шаповалов, Н. Н. Васеленко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, № 12. – С. 1633–1642.

6. А. с. 1247146. СССР. МПК В21J5/00. Материал с нелинейно-вязкими свойствами для физического моделирования процессов обработки металлов давлением в состоянии сверхпластичности / Цепин М. А., Смирнов О. М., Анищенко А. С. [и др.]. – Оpubл. 30.07.1986, Бюл. №28. – 1 с.

7. А. с. 1389107. СССР. МПК В21J5/00. Материал для физического моделирования процессов обработки металлов давлением в состоянии сверхпластичности. / Цепин М. А., Доровских М. А., Кондратьев А. Н. [и др.]. – Оpubл. 30.11.1987, Бюл. №44. – 5 с.

REFERENCES

1. Giuliano G. Superplastic forming of advanced metallic materials / G. Giuliano. – Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2011. – 377 p.

2. Vasin R. A. Vvedenie v mekhaniku sverhplastichnosti. Chast 1 / R. A. Vasin, F. U. Enikeev. – Ufa : GILEM, 1998. – 280 p. (Rus).

3. Vorontsov A. L. Teoria i raschetyi protsessov obrabotki metallov davleniem. V 2 tomah. Tom 1 / A. L. Vorontsov. – M. : MGTU im. Baumana, 2014. – 396 p. (Rus).

4. Rudskoi A. I. Mekhanika dinamicheskoi sverhplastichnosti aliuminievyih splavov / A. I. Rudskoi, Ya. I. Rudaev. – Spb. : Nauka, 2009. – 218 p. (Rus).

5. Korshak V. F. Strukturno-fazovaya relaksatsia v sverhplastichnom evtekticheskom splave Sn-38 % ves. Pb. / V. F. Korchak, Yu. A. Chapovalov, N. N. Vaselenko // Metallofizika i noveychie tehnologii. – 2015, t. 37, №12, P. 1633-1642. (Rus).

6. A. s. 1247146. SSSR. MPK B21J5/00. Material s nelineyno-vyazkimi svoistvami dlya fizicheskogo modelirovaniya protsessov obrabotki metallov davleniem v sostoyanii sverhplastichnosti / Tsepin M. A., Smirnov O. M., Anishchenko A. S. [i dr.]. – Opubl. 30.07.1986, Byul. №28. – 1 p. (Rus).

7. A. s. 1389107. SSSR. MPK B21J5/00. Material dlya fizicheskogo modelirovaniya protsessov obrabotki metallov davleniem v sostoyanii sverhplastichnosti / Tsepin M. A., Dorovskih M. A., Kondratyev A. N. [i dr.]. – Opubl. 30.11.1987, Byul. №44. – 5 p. (Rus).

МАТЕРІАЛ ДЛЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ У СТАНІ НАДПЛАСТИЧНОСТІ

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

В статті запропоновано моделювати процеси над пластичної деформації на оптично прозорих матеріалах, що створені на основі діє нових і вініл ароматичних вуглеводнів, полярного пластифікатора і не забарвлюючого стабілізатора.

На думку авторів, до написання цієї статті найліпшим матеріалом для моделювання процесів над пластичної деформації був сплав олово – 38 % свинець. В статті вказані переваги і недоліки сплаву олово-свинець для моделювання над пластичної деформації.

Переваги: простота формування над пластичної структури; висока чутливість напруги течії до швидкості деформації; низькі напруги течії і великі граничні ступені деформації сплава; діапазон оптимальних температур над пластичності евтектики *Sn-38%Pb* вміщує значення кімнатної температури, це усуває проблеми нагріву зразків.

Недоліки: після інтенсивної деформації заготовки зі сплаву *Sn-38%Pb* необхідно зберігати в морозильній камері, щоб уникнути зростання зерен, яке відбувається в сплаві при кімнатній температурі; деформування сплаву в оптично прозорому інструменті дозволяє спостерігати у динаміці змінення деформованого стану поверхні заготовки, для цього на поверхню треба нанести координатну сітку; деформацію внутрішніх шарів можна вивчати тільки після завершення процесу деформації і наступного розділення заготовки на частини.

В статті надані приклади хімічного складу нових матеріалів: основа (склад компонентів – 100 вагових частин) – бутадієнстірол, ізопренстірол, бутадієн- α -метіл стірол; стабілізатор (склад компонента – 0,5 вагових частин) - 2,6-ді-трет-бутил-4-метілфенол; полярний пластифікатор (склад компонентів – 5 - 40 вагових частин) – дібутилфталат, дібутилсебацинат. Показано, що введення полярного пластифікатора зменшує напругу течії матеріалів (від 6,5 до 0,1 МПа), змінює відносне подовження до розриву (в діапазоні 615 - 145 %) і відносну залишкову деформацію після розриву (в діапазоні 18 – 56 %). Незначне змінення складу пластифікатора дозволяє моделювати або поведінку сплаву з різною надпластичною структурою, або різні температурні умови деформування.

Деформування зразків з блок-сополімерів характеризується високою швидкісною чутливістю напруги течії, коефіцієнт швидкісної чутливості m при швидкостях деформації 10^{-3} - 10^{-4} с⁻¹ має значення в діапазоні 0,26-1,00 і максимум величини в тому ж діапазоні швидкостей деформації, що й для металічних матеріалів.

Ключові слова: надпластичність, матеріал, моделювання, вуглеводень, швидкісне зміцнення.

Аніщенко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри обробки металів тиском, Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, e-mail: as4@ua.ru

Кухар Володимир Валентинович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри обробки металів тиском, Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Присяжний Андрій Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском, Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, e-mail: prisyzhnyj@rambler.ru

MATERIAL FOR PHYSICAL MODELING OF PROCESSING OF METALS BY PRESSURE IN THE STATE OF SUPERPLASTICITY

¹Pryazovskyi State Technical University, Mariupol

The paper proposes to model the processes of superplastic deformation on optically transparent materials created on the basis of diene and vinylaromatic hydrocarbons, a polar plasticizer and an unstressed stabilizer.

The authors argue that before writing this article, the best material for modeling the processes of superplastic deformation was a tin alloy with 38% lead. The authors pointed out the advantages and disadvantages of the tin-lead alloy for modeling superplastic deformation. Advantages: simplicity of superplastic structure formation; high sensitivity of the flow stress to the strain rate; low flow stresses and large ultimate degrees of deformation of the alloy; the range of optimum superplasticity temperatures of eutectic Sn-38% Pb contains room temperature values, this eliminates the problem of sample heating.

Disadvantages: after intensive deformation, the Sn-38% Pb alloy stock must be stored in the freezer to avoid the growth of grains occurring in the alloy at room temperature; deformation of the alloy in an optically transparent tool allows one to observe in dynamics the change in the deformed state of the workpiece surface, for this, a coordinate grid must be applied to the surface; deformation of the inner layers of the alloy can be studied only after the deformation process has ceased and the workpiece is subsequently divided into parts.

The article presents examples of the chemical composition of new materials: base (content of the component - 100 parts by weight) - butadiene styrene, isoprene-styrene, butadiene- α -methylstyrene; Stabilizer (content of the component - 0.5 parts by weight) - 2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol; Polar plasticizer (content of the component - 5 - 40 parts by weight) - dibutyl phthalate, dibutyl sebacate. The authors showed that the introduction of a polar plasticizer reduces the stress of the flow of materials (from 6.5 to 0.1 MPa), changes the elongation to break (in the range of 615 to 145 %), and the relative residual deformation after the fracture (in the range 18-56 %). A slight change in the content of the plasticizer allows one to model either the behavior of an alloy with a different superplastic structure or different temperature conditions of deformation. The deformation of samples from block copolymers is characterized by a high velocity sensitivity of the flow stress, the velocity sensitivity coefficient m at the strain rates of 10^{-3} - 10^{-4} s⁻¹ has values in the range 0.26-1.00 and a maximum value in the same range of strain rates, as for metallic materials.

A slight change in the content of the plasticizer allows one to model either the behavior of an alloy with a different superplastic structure or different temperature conditions of deformation.

With the help of a grid drawn on the diametric plane of such samples and video recording of the deformation process, qualitative and quantitative changes can be analyzed throughout the sample volume at any time.

Key words: superplasticity, material, modeling, hydrocarbons, high-speed, hardening.

Anishchenko Oleksandr, Ph. D., associate professor, senior researcher, assistant professor of Metal Forming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, e-mail: as4@ya.ru

Kukhar Volodymyr, Sc. D., professor, professor of Metal Forming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Pryisyazhnyi Andrii, associate professor, assistant professor of Metal Forming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, e-mail: prisyazhnyj@rambler.ru

МАТЕРИАЛ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

В статье предложено моделировать процессы сверхпластической деформации на оптически прозрачных материалах, созданных на основе диеновых и винилароматических углеводородов, полярного пластификатора и неокрашивающего стабилизатора.

По мнению авторов, до написания этой статьи лучшим материалом для моделирования процессов сверхпластической деформации являлся сплав олово – 38 % свинец. В статье указаны преимущества и недостатки сплава олово-свинец для моделирования сверхпластической деформации.

Преимущества: простота формирования сверхпластичной структуры; высокая чувствительность напряжения течения к скорости деформации; низкие напряжения течения и большие предельные степени деформации сплава; диапазон оптимальных температур сверхпластичности эвтектики $Sn-38\%Pb$ содержит значения комнатной температуры, это устраняет проблемы нагрева образцов.

Недостатки: после интенсивной деформации заготовки из сплава $Sn-38\%Pb$ необходимо хранить в морозильной камере во избежание роста зерен, происходящего в сплаве при комнатной температуре; деформирование сплава в оптически прозрачном инструменте позволяет наблюдать в динамике изменение деформированного состояния поверхности заготовки, для этого на поверхность надо нанести координатную сетку; деформацию внутренних слоев сплава можно изучать только после прекращения процесса деформации и последующего разделения заготовки на части.

Статья представляет примеры химического состава новых материалов: основа (содержание компонента – 100 весовых частей) – бутадиенстирол, изопренстирол, бутадиен- α -метилстирол; стабилизатор (содержание компонента – 0,5 весовых частей) – 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол; полярный пластификатор (содержание компонента – 5 – 40 весовых частей) – дибутилфталат, дибутилсебацат. Показано, что ввод полярного пластификатора уменьшает напряжение течения материалов

Незначительное изменение содержания пластификатора позволяет моделировать либо поведение сплава с различной сверхпластичной структурой, либо различные температурные условия деформирования.

С помощью координатной сетки, нанесенной на диаметральную плоскость таких образцов, и видеосъемки процесса деформации можно проводить анализ качественных и количественных изменений по всему объему образцов в любой промежуток времени.

Ключевые слова: сверхпластичность, материал, моделирование, углеводороды, скоростное упрочнение.

Анищенко Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры обработки металлов давлением, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, e-mail: as4@ua.ru

Кухарь Владимир Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Присяжный Андрей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, e-mail: prisyzhnyj@rambler.ru