

А. С. Анищенко<sup>1</sup>  
В. В. Кухарь<sup>1</sup>  
А. Г. Присяжный<sup>1</sup>

## МАТЕРИАЛ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

<sup>1</sup>ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,  
г. Мариуполь

### Аннотация

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

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

### Abstract

It is proposed to model the processes of superplastic deformation on optically transparent materials created on the basis of dienic and vinylaromatic hydrocarbons, a polar plasticizer and a non-color stabilizer. It is shown that the coefficient of high-speed hardening of such materials can vary from 0.2 to 1.0 in the intervals of superplastic strain rates

**Keywords:** superplasticity, material, modeling, hydrocarbons, high-speed, hardening

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  $m = d(\ln\sigma) / d(\ln\dot{\xi})$  ( $\sigma$  – 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.

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 разреза тушью наносили прямоугольную координатную сетку, после чего заготовку помещали в оптически прозрачный штамповый инструмент и прикладывали к ней деформирующую нагрузку.

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- $\alpha$ -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
Дибутилсебацат	-	-	-	-	-	-	5	10	15	20	30	40	-	-

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.

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 $10^{-3}-10^{-4} \text{ с}^{-1}$	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

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 были разработаны ряд составов нелинейно-вязких полимерных композиций, содержание компонентов которых приведено в табл. 1. Блок-сополимеры с неокрашивающим стабилизатором вальцевали при 70-75 °С в течение 2 минут до образования эластичной ленты, затем вводили полярный пластификатор (дибутилфталат или дибутилсебацнат). Смесь перемешивали в вальцах путем частичной срезки ее с валков. Образцы для испытаний прессовали на гидропрессе при температуре плит 150 °С и давлении 7,5 МПа, после чего охлаждали под давлением до температуры 30 °С.

Физико-механические испытания образцов проводили в соответствии с ГОСТ 269, 270 для резин, коэффициент  $m$  определяли методом релаксации напряжений [4] на образцах с размерами Ø20x30 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.

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 разреза 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  $\sigma = f(\xi)$  и определить коэффициент  $m$  по тангенсу угла наклона графиков к оси  $\xi$  (рис. 1).

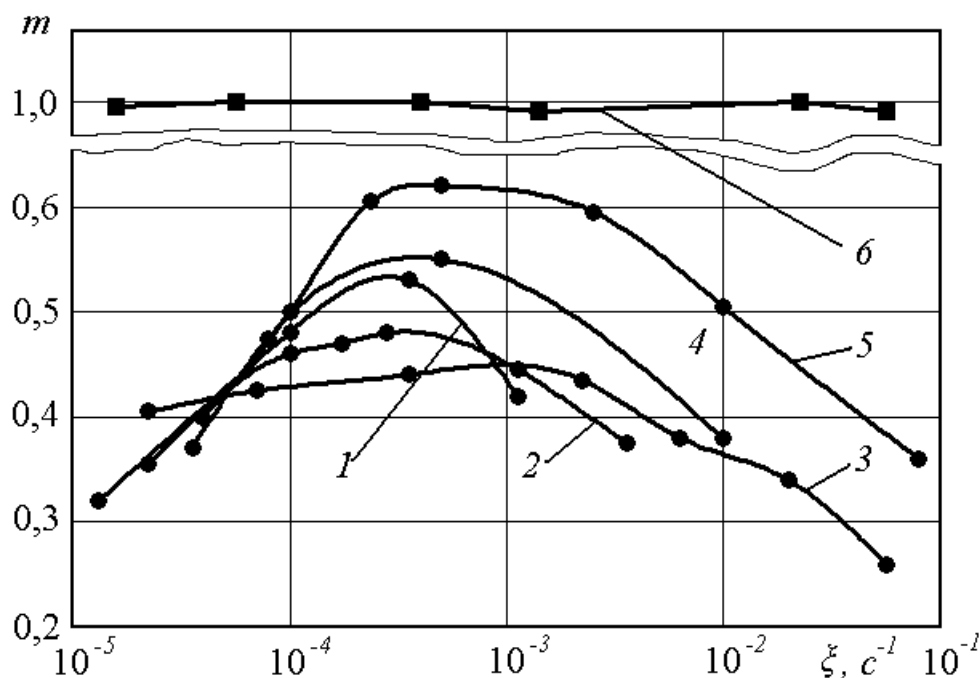


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента скоростного упрочнения от скорости деформации при осадке оптически прозрачных блок-сополимеров с содержанием компонентов согласно табл. 1

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. – 377p.

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 томах. Том 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.

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

**Кухарь Владимир Валентинович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ОМД, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, e-mail: kvv\_mariupol@mail.ru

**Присяжный Андрей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры ОМД, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, e-mail: prisyazhnyj@rambler.ru

**Anishchenko Oleksandr**, Ph. D., associate professor, senior researcher, assistant professor of MF department, Pryazovskyi State Technical University (PSTU), Mariupol, e-mail: as4@ya.ru

**Kukhar Volodymyr**, Sc. D., professor, professor of MF department, Pryazovskyi State Technical University PSTU, Mariupol, e-mail: kvv\_mariupol@mail.ru

**Pryisyazhnyi Andrii**, Ph. D., associate professor, assistant professor of MF department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, e-mail: prisyazhnyj@rambler.ru