

УДК 621.771:669.018

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261119.78.591

## ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ ЛИТЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

ТРОФИМЕНКО В. В.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ТРОФИМЕНКО А. В.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, 49005, Днепро. Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Кафедра двигателестроения, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-98-41, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-5312-9658

**Аннотация. Постановка проблемы.** Задача преобразования лучистой энергии в тепловую или электрическую связана с необходимостью применения новых материалов с высокой поглощательной способностью и теплопроводностью. Металлы с чистой гладкой поверхностью имеют низкие значения степени черноты и поглощательной способности и, следовательно, довольно высокие значения отражательной способности. Специальные покрытия и краски не решают проблемы из-за снижения теплопроводности и их деградации со временем. Применение пористых литых металлов и сплавов, имеющих сотовую структуру, значительно увеличит удельную площадь поверхности конструкции, а также позволит осуществлять объемное поглощение падающего интегрального излучения. **Цель работы.** Исследование закономерностей формоизменения пористых литых металлов при пластической деформации для получения регламентированной структуры и свойств в элементах конструкции теплообменных аппаратов. **Результаты.** Экспериментально установлено, что изменение толщины перегородок в пористых литых металлах в процессе деформации происходит согласно закономерностям изменения средней толщины стенки трубы при редуцировании. Пористые литые металлы при пластической деформации ведут себя как пакет труб, в которых работа деформации весьма значительна как при осевых, так и радиальных нагрузках. При прокатке наблюдается более интенсивное уменьшение диаметра пор и пористости по сравнению с волочением. **Научная новизна.** Показано, что с помощью пластической деформации пористых литых металлов можно управлять их структурой и физическими свойствами, например, поглощательной и излучательной способностями. **Практическая значимость.** Полученные материалы обладают высокой поглощательной способностью в направлении ориентации пор. Это способствует широкому их применению в поглотителях солнечной энергии для солнечных коллекторов, излучателях холодильников-излучателей и других элементах конструкции энергетических установок. Использование пористых литых металлов в теплообменниках резко уменьшит металлоемкость и повысит тепловую эффективность агрегата.

**Ключевые слова:** пластическая деформация; пористый литой металл; поглощательная способность; теплопроводность; сотовая структура

## ЗМІНА ФОРМИ ПОРИСТИХ ЛІТИХ МЕТАЛІВ ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

ТРОФИМЕНКО В. В.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ТРОФИМЕНКО А. В.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Кафедра двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-41, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-5312-9658

**Аногация. Постановка проблеми.** Питання перетворення променистої енергії на теплову або електричну пов'язане з необхідністю використання нових матеріалів із високою поглинальною здатністю і теплопровідністю. Метали з чистою гладкою поверхнею мають низькі значення ступеня чорноти і поглинальної здатності, отже досить високі значення відбивної здатності. Спеціальні покриття і фарби не вирішують проблеми через зниження теплопровідності та їх деградацію з часом. Використання пористих литих металів і сплавів, які мають сотову структуру, значно збільшує площину поверхні конструкції, а також дозволяє здійснювати об'ємне поглинання падаючого випромінювання. **Мета роботи** – дослідження

закономірностей зміни форми пористих литих металів за пластичної деформації для отримання регламентованої структури і властивостей в елементах конструкції теплообмінних апаратів. **Результати.** Експериментально доведено, що зміна товщини перегородок у пористих литих металах у процесі деформації відбувається згідно із закономірностями зміни середньої товщини стінки труби під час редукування. Пористі литі метали за пластичної деформації поведуться як пакет труб, у яких робота деформації значуща як за осьових, так і за радіальних навантажень. Під час прокатки спостерігається інтенсивніше збільшення діаметра пор і пористості порівняно з волочінням. **Наукова новизна.** Встановлено, що за допомогою пластичної деформації пористих литих металів можливо керувати їх структурою та фізичними властивостями, наприклад, поглинальною та випромінювальною здатностями. **Практична значущість.** Одержані матеріали мають високу поглинальну здатність у напрямку орієнтації пор. Це сприяє широкому їх використанню в поглиначах сонячної енергії для сонячних колекторів, у випромінювачах холодильників-випромінювачів та інших елементах конструкцій для енергетичних установок. Використання пористих литих металів у теплообмінниках різко зменшить металоємність і збільшить теплову ефективність агрегата.

**Ключові слова:** пластична деформація; пористий литий метал; поглинальна здібність; теплопровідність; сотова структура

## CHANGE FORM OF POROUS CAST METALS AT PLASTIC DEFORMATION

TROFYMENKO V.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
TROFYMENKO A.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Technology, State Higher Educational Institution “Ukrainian State Chemical-Technological University”, 8, Gagarina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Department of Engine Building, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-41, e-mail: [antrof2005@gmail.com](mailto:antrof2005@gmail.com), ORCID ID 0000-0001-5312-9658

**Abstract. Problem statement.** The decision of a problem of transformation radiant energy in the thermal or electric is connected with necessity of application of new materials with high absorb ability and heat conductivity. Metals with a pure smooth surface have low values of degree of blackness and absorption abilities and, hence, high enough values of reflective ability. Special coverings and paints do not solve a problem because of decrease in heat conductivity and their degradation in due course. Application of porous cast metals and the alloys having cellular structure, considerably will increase the specific area of a surface of a design, and also will allow to carry out volume absorption of falling radiation. **Purpose.** Research laws change form of porous cast metals at plastic deformation for reception of the regulated structure and properties in design elements heat transfer devices. **Results.** It is experimentally established that change a thickness of partitions in porous cast metals in the course of deformation occurs according to laws change of an average thickness wall of a pipe at reduce. Porous cast metals at plastic deformation behave as a package of pipes in which deformation work is rather considerable as at axial, and radial loadings. At a proskating rink more intensive reduction of diameter a time and porosity in comparison with drawing is observed. **Scientific novelty.** It is shown that by means of plastic deformation of porous cast metals it is possible to operate their structure and physical properties, for example absorption and radiating abilities. **Practical relevance.** The received materials possess high absorption ability in a direction of orientation of a time. It promotes their wide application in absorbers of solar energy for solar collectors, radiators of refrigerators-radiators and other elements of a design of power installations. Use of porous cast metals in heat exchangers will sharply reduce metal consumption and will raise thermal efficiency of the unit.

**Keywords:** plastic deformation; porous cast metal; поглощательная ability; heat conductivity; cellular structure

**Введение.** Получение металлов с регулируемой пористой структурой и заданными физико-механическими свойствами реализуется технологиями литья в вакуумно-компрессорных установках с формированием столбчатой эвтектики, одной из фаз которой является газообразный водород при заданных условиях кристаллизации систем металл – водород

[1]. Это позволяет получать изделия со структурой порового пространства типа «идеальное пористое тело» (рис. 1).

Такие материалы могут иметь название «пенометаллы» или «газоармированные материалы» – газары, или пороармированные материалы – ПАМ. По аналогии с существующим термином в металлургии пористые спеченные

материалы ПСМ, для названия данного класса материалов применен термин: «пористые литые материалы» – ПЛМ.

В теплообменных аппаратах, в частности, в солнечном воздухонагревателе [2], рабочая поверхность поглотителя выполнена в виде капиллярной структуры из ПЛМ. Поглотитель с тупиковыми капиллярами интенсифицирует как поглощение излучения, приближая поглотитель по характеру процесса поглощения к абсолютно черному телу, так и теплоотдачу воздушного потока за счет его турбулизации. Это повышает КПД воздухонагревателя. Поэтому задача

определения наиболее рациональных геометрических параметров структурного строения является актуальной и необходимой в применении ПЛМ на металлической основе для теплообменников [3; 4].

Одним из перспективных способов регулирования структуры пористых литых материалов является их прокатка, позволяющая уменьшить диаметр пор, изменять плотность металла, увеличивать степень текстурирования и пр., что дает огромные возможности для различных конструктивных решений в энергетических устройствах [5].

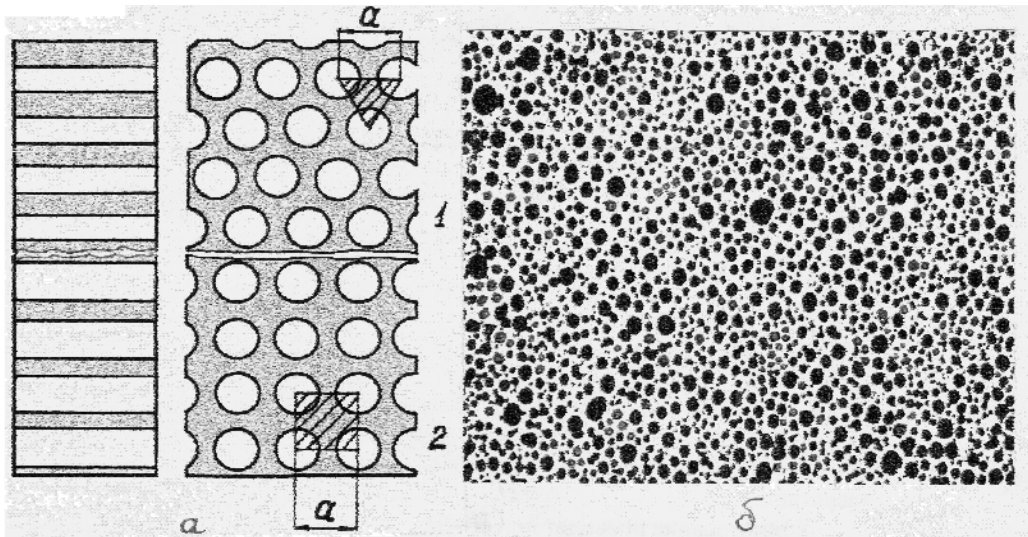


Рис. 1. Макроструктура пористых литых материалов: а – теоретическая модель «идеальное пористое тело»; б – эвтектическая структура систем металл–водород / Fig. 1. The macrostructure of porous cast materials: а – the oretical model «an ideal porous body»; b – the evtectic structure of systems metal–hydrogen

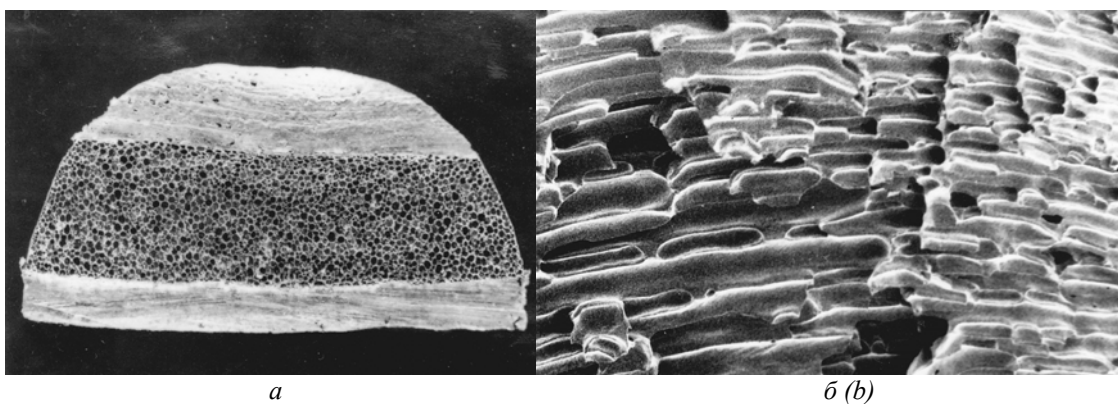


Рис. 2. Поперечный (а) и продольный (б) изломы пористых литых прутков из меди / Fig. 2. The cross-section (a) and longitudinal (b) breaks porous cast прутков from copper

**Цель работы** – исследование пористых литых материалов при закономерностей формоизменения пластической деформации для получения

регламентированной структуры и свойств для элементов конструкций теплообменных аппаратов.

**Материал и методики исследования**

В качестве модельного материала для исследования выбраны литые пористые прутки из меди с направленными цилиндрическими порами.

Пористость образцов определялась гидростатическим взвешиванием. Диапазон ее изменения составил 1...45 %. Диаметр пор и толщину межпоровых перегородок определяли с изломов (рис. 2) с помощью стереоскопического микроскопа МБС-9 и по фрактограммам, снятым на растровом электронном микроскопе РЕМ-106И с последующим расчетом по формулам 1 и 2:

$$d = 0.1128 \sqrt{\frac{F\Pi}{m}}; \tag{1}$$

$$S = d (9.523 \Pi^{-\frac{1}{2}} - 1), \tag{2}$$

где  $d$  – диаметр пор;  $S$  – толщина межпоровых перегородок;  $F$  – площадь участка поперечного сечения образца;  $m$  – количество пор на этом участке;  $\Pi$  – пористость образца.

Пластическую деформацию ЛПМ осуществляли на прокатном стане до 150 и волочильном стане цепного типа.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты экспериментов показали, что с увеличением степени деформации пористость ЛПМ монотонно понижается (рис. 3). Причем при прокатке наблюдается более интенсивное снижение пористости, чем при волочении.

С ростом степени деформации ЛПМ происходит монотонное уменьшение диаметра пор более интенсивно, чем при волочении (рис. 4).

Подучены зависимости изменения толщины межпоровых перегородок от степени деформации ПМ с различной пористостью (рис. 5). При волочении медных прутков с исходной пористостью 45 % наблюдалось утолщение межпоровых перегородок, а при волочении прутков с пористостью 28 и 14 % – сначала утолщение, а затем утонение. При прокатке медных прутков с исходной пористостью

28 и 14 % – также происходит утолщение, а затем утонение межпоровых перегородок.

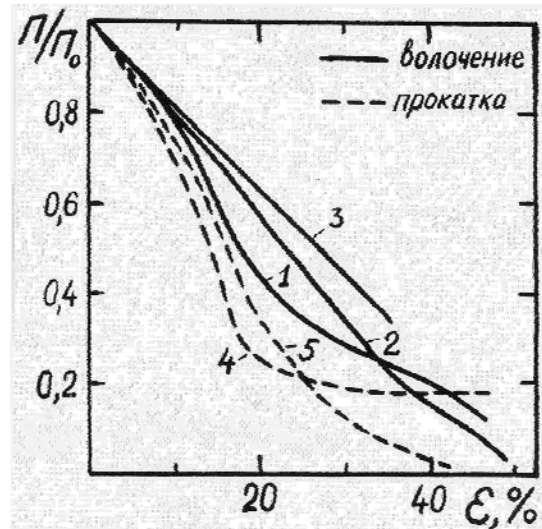


Рис. 3. Зависимость пористости ЛПМ от степени деформации: 1 и 4 –  $\Pi_0=14\%$ ; 2 и 5 –  $\Pi_0=28\%$ ; 3 –  $\Pi_0=45\%$  / Fig. 3. The dependence porosity of porous cast metals on deformation degree: 1 and 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 and 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$

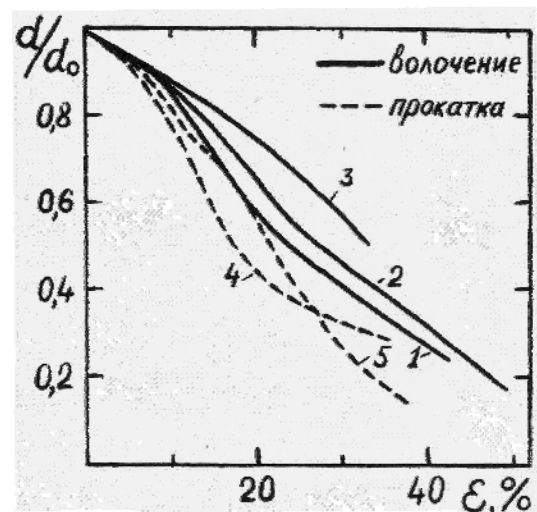


Рис. 4. Зависимость диаметра пор ЛПМ от степени деформации: 1 и 4 –  $\Pi_0=14\%$ ; 2 и 5 –  $\Pi_0=28\%$ ; 3 –  $\Pi_0=45\%$  / Fig.4. The dependence diameter of porous cast metals on time deformation degree: 1 and 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 and 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$

Для объяснения полученных зависимостей формоизменения ПЛМ от степени деформации рассмотрим формоизменение единичной ячейки – поры с окружающей ее матрицей (рис. 6).

Учитывая то, что материал имеет однонаправленные вытянутые поры, а также принятые допущения:

1 – поры сквозные, форма пор цилиндрическая;

2 – поры в поперечном сечении медного пористого прутка распределены согласно схеме на рисунке 6.

Каждую единичную ячейку можно рассматривать как отдельную шестигранную трубу с внутренним диаметром  $d$ .

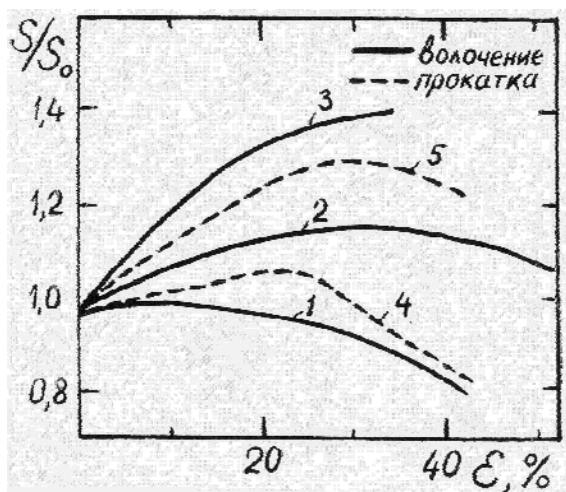


Рис. 5. Зависимость толщины межпоровых перегородок пористых медных прутков от степени деформации: 1 и 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 и 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$  / Fig. 5. The dependence thickness between porous partitions of porous copper rod from deformation degree: 1 and 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 and 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$

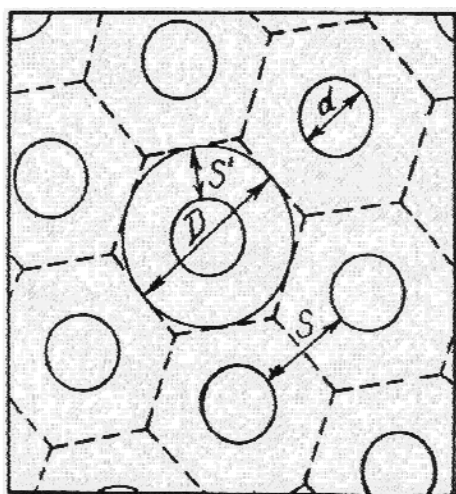


Рис. 6. Схема расположения индивидуальных ячеек в поперечном сечении ПЛМ / Fig. 6. The scheme of an arrangement of individual cells in cross-section of porous cast metals

Для исследования закономерностей формоизменения шестигранной трубы (единичной ячейки) при пластической

деформации найдем ее приведенный диаметр  $D'$  и толщину стенки  $S'$ .

Из геометрических соотношений размеров единичной ячейки следуют зависимости:

$$D' = 1.05(S+d); \quad (3)$$

$$S' = 0.525 S + 0.025 d, \quad (4)$$

где  $S$  – толщина межпоровых перегородок;  $d$  – диаметр пор.

Вопрос об изменении толщины стенки трубы при редуцировании и калибровании без натяжения в настоящее время хорошо исследован [5; 6]. В соответствии с выводами этих работ одним из основных фактов, влияющих на изменение толщины стенки при прокатке без натяжения, является степень толстостенности трубы  $S/D$ . При  $S/D < 0,333-0,354$  наблюдается утолщение стенки трубы, при  $S/D > 0,333-0,354$  – утонение.

Критическое значение  $S/D$  находится в интервале  $0,333-0,354$  и зависит от числа валков, образующих калибр.

С увеличением числа валков в клетки склонность к утолщению стенки уменьшается. Это объясняется соответствующим уменьшением неравномерности распределения напряжений в очаге деформации [6; 7].

Результаты экспериментов показали, что  $S'/D'$  единичной ячейки газаров с различной пористостью с увеличением степени деформации монотонно возрастает (рис. 7). Исследование процесса свободной прокатки газаров с пористостью 28% и 14% показало, что при  $S'/D' < 0,4$  происходит утолщение межпоровой перегородки, а при  $S'/D' > 0,4$  – утонение.

Можно предположить, что изменение толщины межпоровых перегородок газаров в процессе деформации происходит аналогично изменению толщины стенки трубки при редуцировании. Более высокую величину критического значения  $S'/D'$  можно объяснить большей неравномерностью распределения напряжений в стенках единичной ячейки газа при деформации по сравнению с распределением напряжений в стенках деформируемой трубы.



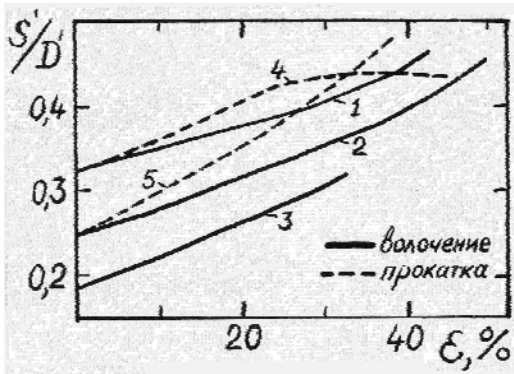


Рис. 7. Зависимость величины  $S'/D'$  газаров с различной пористостью от степени деформации: 1 и 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 и 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$  / Fig. 7. The dependence size  $S'/D'$  of gasarov with various porosity from deformation degree: 1 and 4 –  $P_0=14\%$ ; 2 and 5 –  $P_0=28\%$ ; 3 –  $P_0=45\%$

Исследование процесса волочения газаров показало, что утонение межпоровых перегородок наблюдается при  $S'/D' > 0,34-0,36$ , а при  $S'/D' < 0,34-0,36$  происходит утолщение межпоровых перегородок. Так, при волочении медного прутка с исходной пористостью 45% толщина межпоровых перегородок монотонно увеличивается, т. к. величина  $S'/D'$  не достигает критического значения.

Снижение отношения критической величины  $S'/D'$  при волочении по сравнению с прокаткой объясняется тем, что за счет усилия волочения в объеме матрицы газара создаются дополнительные продольные растягивающие напряжения, которые способствуют большему течению металла вдоль оси деформируемого образца и уменьшают его радиальное течение. В результате этого склонность к утолщению стенки уменьшается [6].

Как уже говорилось выше, уменьшение пористости и диаметра пор ПЛМ с повышением степени деформации при прокатке более интенсивно, чем при волочении (рис. 3; 4). При обжатии прутка по диаметру металл в очаге деформации течет в продольном и радиальном направлениях. При волочении, по сравнению со свободной прокаткой, за счет создания дополнительных продольных растягивающих напряжений, уменьшающих радиальное течение металла, доля металла,

смещающегося в радиальном направлении, меньше и, соответственно, в продольном больше. Таким образом, при прокатке за счет более значительного радиального течения металла наблюдается более интенсивное уменьшение диаметра пор и пористости ПЛМ по сравнению с волочением.

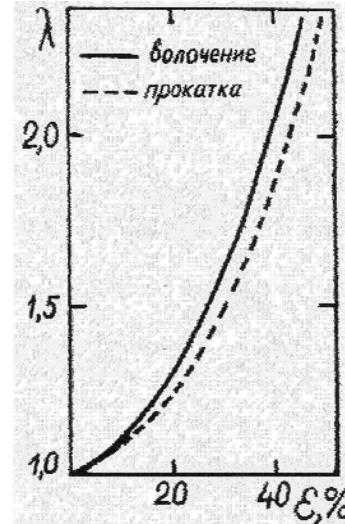


Рис. 8. Зависимость вытяжки ПЛМ от степени деформации / Fig. 8. The dependence extract of porous cast metals on deformation degree

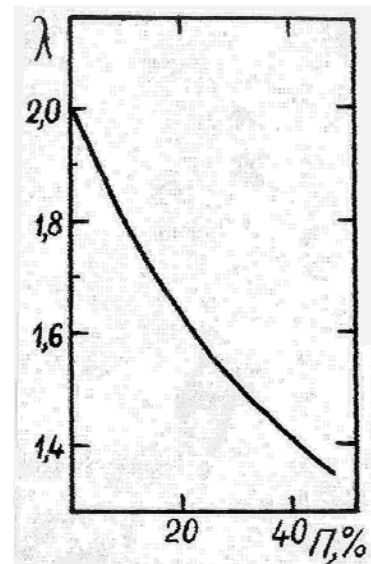


Рис. 9. Зависимость вытяжки ПЛМ от их исходной пористости при деформации по диаметру 30% / Fig. 9. The dependence of the extraction of PLM on their initial porosity during deformation along the diameter of 30%

Об этом свидетельствует и большая при одинаковом обжатии по диаметру вытяжка при волочении, чем при прокатке (рис. 8),

что соответствует литературным данным по исследованию деформирования труб [6–8].

С увеличением пористости газаров величина  $S'/D'$  уменьшается и склонность к утолщению межпоровых перегородок повышается. Следовательно, вытяжка деформируемых образцов должна уменьшаться, что подтверждается экспериментальными данными [8].

Результаты исследований показали, что изменение толщины междупоровых перегородок ПЛМ в процессе деформации происходит согласно закономерностям изменения средней толщины стенки трубы при редуцировании. Существует много методик для расчета изменения средней толщины стенки трубы [6–10]. Для расчета изменения толщины приведенной стенки единичной ячейки при пластической деформации ПЛМ наиболее удобны методики: Г. И. Гуляева и Г. Н. Ившика;

Г. Я. Гуна. Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую их сходимость.

### Выводы

1. Экспериментально установлена зависимость вытяжки деформируемого образца от его пористости. Показано, что при одинаковом обжатии по диаметру вытяжка при волочении больше, чем при прокатке.

2. Использование предлагаемой методики расчета изменения толщины межпоровых перегородок дает возможность прогнозировать изменение диаметра и протяженности пор, пористости газаров, а также выбирать наиболее рациональные режимы деформации для получения изделий с заданными параметрами поровой структуры.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шаповалов В. И. Легирование водородом : монография / В. И. Шаповалов. – Днепропетровск : Журфонд, 2013. – 385 с.
2. А.С. № 1495595 Солнечный воздухонагреватель / Трофименко А. А., Трофименко В. В. – Опубл. 23.07.1989. – Бюл. № 27. – 1989. – МКИ F 24 J 2/28.
3. Sorensen B. Solar energy storage / B. Sorensen // Academic Press. – 2015. – 1st ed. – 394 p.
4. Трофименко В. В. Особенности структуры и использования газоармированных материалов в энергетических устройствах / В. В. Трофименко, А. В. Трофименко // Металознавство та термічна обробка металів. – Дніпро: ПДАБА, 2017. – № 4. – С.44–51.
5. Трофименко В. В. Перспективы применения газоармированных металлов в энергетических устройствах : коллективна монографія в 2-х книгах / [В. В. Трофименко, А. В. Трофименко] // Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії. – Кн. 1. – Дніпро : Нова ідеологія, 2017. – С.77–80.
6. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб : монография / [Г. И. Гуляев, П. Н. Ившин, И. Н. Еролях и др.]. – Москва : Металлургия, 1975. – 263 с.
7. Пластическое формоизменение металлов : монография / [Г. Я. Гун, П. И. Полухин, А. В. Крупин и др.]. – Москва : Металлургия, 1968. – 416 с.
8. Холодное волочение труб : монография / [В. С. Паршин, А. А. Фотов, В. А. Алешин]. – Москва : Металлургия, 1979. – 240 с.
9. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением : монография / [Г. И. Гуляев, С. А. Чукмасов, А. В. Губинский]. – Киев : Наукова думка, 1986. – 240 с.
10. Ruzhu W. Advances in solar heating and cooling / W. Ruzhu, G. Tianshu // Woodhead Publishing. – 2016. – 1st ed. – 596 p.

### REFERENCES

1. Shapovalov V.I. *Legirovanie vodorodom* [Doping with hydrogen]. Dnipropetrovsk : Zhurfond Publ., 2013, 385 p. (in Russian).
2. Trofymenko A.A. and Trofymenko V.V. Solar air heater Patent, AS No. 1495595, МКИ F 24 J 2/28, news. no. 27, 1989. (in Russian).
3. Sorensen B. Solar energy storage. Academic Press, 2015, 1<sup>st</sup> ed., 394 p.
4. Trofymenko V.V. and Trofymenko A.V. *Osobennosti struktury i ispol'zovaniya gazoarmirovannykh materialov v energeticheskikh ustroystvakh* [Features of structure and use include gas metals in power devices]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal science and heat treatment of metals]. Dnipro : PSACEA, 2017, no.4, pp. 44–51. (in Russian).

5. Trofymenko V.V. and Trofymenko A.V. *Perspektyvy prymenenyya hazoarmirovannykh metallov v énerhetycheskykh ustroystvakh : kolektivna monografiya v 2-kh knyhakh* [Prospects for the use of gas-reinforced metals in energy devices : a collective monograph in 2 books]. *Teplotekhnika, enerhetyka ta ekolohiya v metalurhiyi* [Heat engineering, energy and ecology in metallurgy]. Book 1, Dnipro : A New Ideology, 2017, pp. 77–80. (in Russian).
6. Guljaev G.I., Ivshin P.N., Eroljah I.N. and oth. *Tekhnologiya nepreryvnoy bezopravchoy prokatki trub* [Technology continuous proskating rinks of pipes without of the directing]. Moscow : Metallurgy, 1975, 263 p. (in Russian).
7. Gun G.J., Poluhin P.I. and Krupin A.V. *Plasticheskoye formoizmeneniye metallov* [Plastic form change of metals]. Moscow : Metallurgy, 1968, 416 p. (in Russian).
8. Parshin V.S., Fotov A.A. and Aleshin V.A. *Kholodnoye volocheniye trubiya* [Cold drawing of pipes]. Moscow : Metallurgy, 1979, 240 p. (in Russian).
9. Guljaev G.I., Chukmasov S.A. and Gubinskij A.V. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniyem* [Mathematical modelling processes the processing of metals by pressure]. Kyiv : Naukova dumka, 1986, 240 p. (in Russian).
10. Ruzhu W. and Tianshu G. *Advances in solar heating and cooling*. Woodhead Publishing, 2016, 1<sup>st</sup> ed., 596 p.

Надійшла до редакції 12.09.2019.