

УДК 621.77.014

Натурное моделирование деформирования пористых материалов в кристаллизаторе установки вертикального литья и деформации металла

В.В. Черномас¹, Е.Б. Щелкунов²¹ ФГБОУ ВО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет»² ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Natural simulation of deformation in the porous materials in a crystallizer of the vertical casting and metal deformation system

V.V. Chernomas¹, E.B. Shchelkunov²¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Amur State University of Humanities and Pedagogy² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amur State University

Перспективным направлением развития металлургии является создание металлических пеноматериалов, обладающих уникальными преимуществами перед сплошными материалами на основе металлов и сплавов. Вместе с тем сплошные материалы имеют низкие пластические свойства, что существенно ограничивает возможность изготовления из них изделий путем пластического деформирования. Проведено экспериментальное исследование характера деформирования заготовок с различными расположением и степенью пористости при циклическом воздействии на них подвижных стенок кристаллизатора установки вертикального литья и деформации металла. Установлено, что при равных условиях степени деформирования образцов трех типов характер искажения ячеек делительной сетки всех их слоев аналогичен с явным преобладанием деформации в продольном направлении (направлении выхода заготовки). Максимальные усилия, создаваемые подвижными стенками кристаллизатора, наблюдались при деформировании образцов с открытыми порами. Наименьшие усилия требуются для деформирования образца без пористости.

EDN: BZUAAF, <https://elibrary/bzuaaf>**Ключевые слова:** метод делительных сеток, деформирование металлоизделия, пористые материалы, образец, установка вертикального литья и деформации металла

A promising direction in the metallurgy development is creation of the metal foam materials that have unique advantages over solid materials based on the metals and alloys. At the same time, solid materials have low plastic properties, which significantly limits a possibility of manufacturing products from them by the plastic deformation. An experimental study was conducted on the nature of deformation in the blanks with different positions and porosity degrees under cyclic action on them of the moving walls of the crystallizer of a vertical casting and metal deformation system. It was established that under equal conditions of the deformation degree of samples of three types, the nature of distortion in the cells of the dividing grid in all their layers was similar with a clear deformation predominance in the longitudinal direction (blank exit direction). Maximum forces created by the crystallizer mov-

ing walls were observed in deformation of the samples with the open pores. The least forces were required to deform a sample without porosity.

EDN: BZUAAF, <https://elibrary/bzuaaf>

Keywords: dividing grid method, metal product deformation, porous materials, sample, vertical casting and metal deformation system

Перспективным направлением развития металлургии является создание пористых металлических материалов (пеноматериалов), обладающих уникальными преимуществами перед сплошными материалами на основе металлов и сплавов: низкой плотностью при достаточно высокой удельной прочности, высокими степенью шумопоглощения и газопроницаемостью, низким гидравлическим сопротивлением. Благодаря перечисленным свойствам такие материалы находят применение во многих отраслях промышленности: авиа- и ракетостроении, специальном машиностроении, автомобилестроении, теплоэнергетике и др. [1–6].

Вместе с тем указанные материалы имеют низкие пластические свойства, что существенно ограничивает возможность изготовления из них изделий путем пластического деформирования [1].

К перспективным способам обработки давлением металлических пеноматериалов относится пластическое деформирование на устройстве вертикального литья и деформации металла (УВЛДМ), разработанном в Институте машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Принцип действия УВЛДМ состоит в сложном циклическом нагружении материала заготовки, одновременно подвергаящем его деформации сдвига и растяжению–сжатию [7–10]. Однако из-за особенностей воздействия рабочего органа УВЛДМ на материал заготовки определение напряженно-деформированного состояния заготовки из пористого материала вызывает существенные затруднения, связанные с заданием граничных условий и циклическостью процесса. Решением указанной проблемы может быть натурное моделирование процесса [11].

Цель работы — исследование характера деформирования заготовок из пористых материалов путем натурального моделирования процесса на УВЛДМ.

Методика исследования. Для реализации поставленной цели выбран метод делительных

сеток, успешно применяемый при изучении процессов пластического деформирования [12, 13]. Суть метода заключается в предварительном нанесении на поверхность испытуемого образца сетки, состоящей из одинаковых ячеек [14–16]. Далее образец деформируют и по искажению сетки судят об его плоскодеформированном и плосконапряженном состояниях. Недостатком метода является невозможность определения напряженно-деформированного состояния внутри материала образца.

Для определения напряженно-деформированного состояния в объемных заготовках предложена методика, основанная на применении заготовок, представляющих собой трехслойный пакет с нанесенной на поверхность каждого слоя делительной сеткой. В качестве материала заготовки использован свинцово-сурьмянистый сплав ССу (ГОСТ 1292–81), часто применяемый в качестве модельного материала при исследовании процессов пластической деформации.

Пакет собирали из пластин длиной 280 мм, шириной 60 мм и толщиной 4 и 5 мм. Сетку наносили путем процарапывания на глубину 1 мм. Размеры базы сетки, выбранные из соображения обеспечения однородности деформации в пределах одной ячейки, составляли 10×10 мм. Для имитации пористости на пластинах толщиной 5 мм в узлах ячеек сетки высверливали сквозные отверстия диаметром 5 мм.

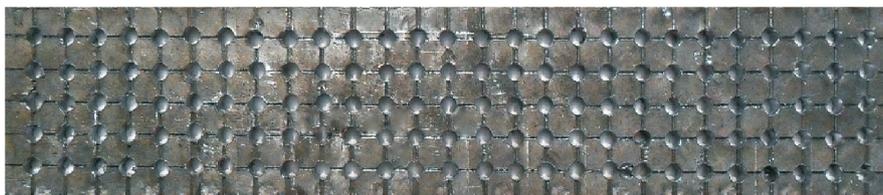
Внешний вид образцов пластин с нанесенной на них делительной сеткой и отверстиями, имитирующими поры, показан на рис. 1, а и б.

Пластины собирали в пакет (рис. 2) в различных сочетаниях. Для предотвращения slipping слоев пакета на контактные поверхности пластин наносили индустриальное масло И-5А (ГОСТ 20799–88). Слои пакета скрепляли между собой свинцовыми заклепками диаметром 5 мм, что обеспечивало надежную фиксацию и исключало их относительное смещение в процессе нагружения. Каждый пакет представлял собой один образец.

Исследовали образцы трех типов: со слоями без пористости и пористыми слоями разной

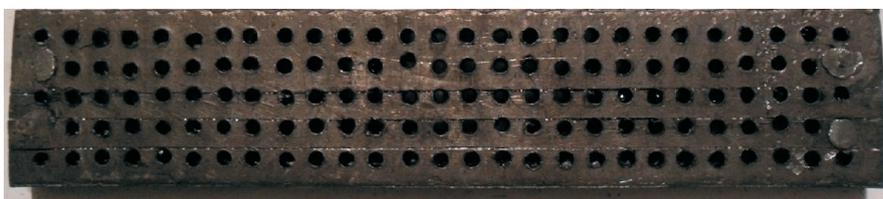


а



б

Рис. 1. Внешний вид слоев образцов пластин с делительной сеткой (а) и отверстиями, имитирующими поры (б)



а



б

Рис. 2. Виды пакета пластин спереди (а) и сверху (б)

компоновки. Типы образцов, использованных для натурного моделирования, приведены в таблице, где 0 — слой без пористости; 1 — пористый слой. У первого образца нет пор. Второй образец имеет закрытые поры, а третий — открытые.

Температура образца и рабочих поверхностей кристаллизатора на момент начала испытания равнялась 20 °С. Смазку рабочих поверхностей не применяли. Расчетная степень деформации образца в калибрующей зоне кристаллизатора составляла 0,5.

Типы образцов

Номер образца	Схема компоновки слоев образца	Пористость, %
1	0-0-0	0
2	0-1-0	5
3	1-1-1	16

Натурное моделирование проводили в следующей последовательности. Каждый подготовленный образец (пакет) помещали в кристаллизатор УВЛДМ с максимально разведенными боковыми стенками. Затем включали привод рабочих частей кристаллизатора, продвигающий испытуемый образец в зону калибрования, где он деформировался. Процесс повторяли до полного выхода образца из калибрующей зоны. Частота вращения вала привода составляла 100 мин⁻¹. Деформированный образец разделяли по слоям. Поверхности с нанесенной делительной сеткой фотографировали, фотографии оцифровывали.

Величину искажения делительной сетки находили путем измерения ее элементов на фотографиях в программе Image Pro Plus 6.0. Определяли длины осей эллипсов, вписанных в ячейки делительной сетки, и углы поворота этих осей относительно исходной сетки.

Расчет компонентов деформации выполнялся в программном комплексе MathCAD.

Обсуждение результатов. Внешний вид образцов после деформации показан на рис. 3, а–в.

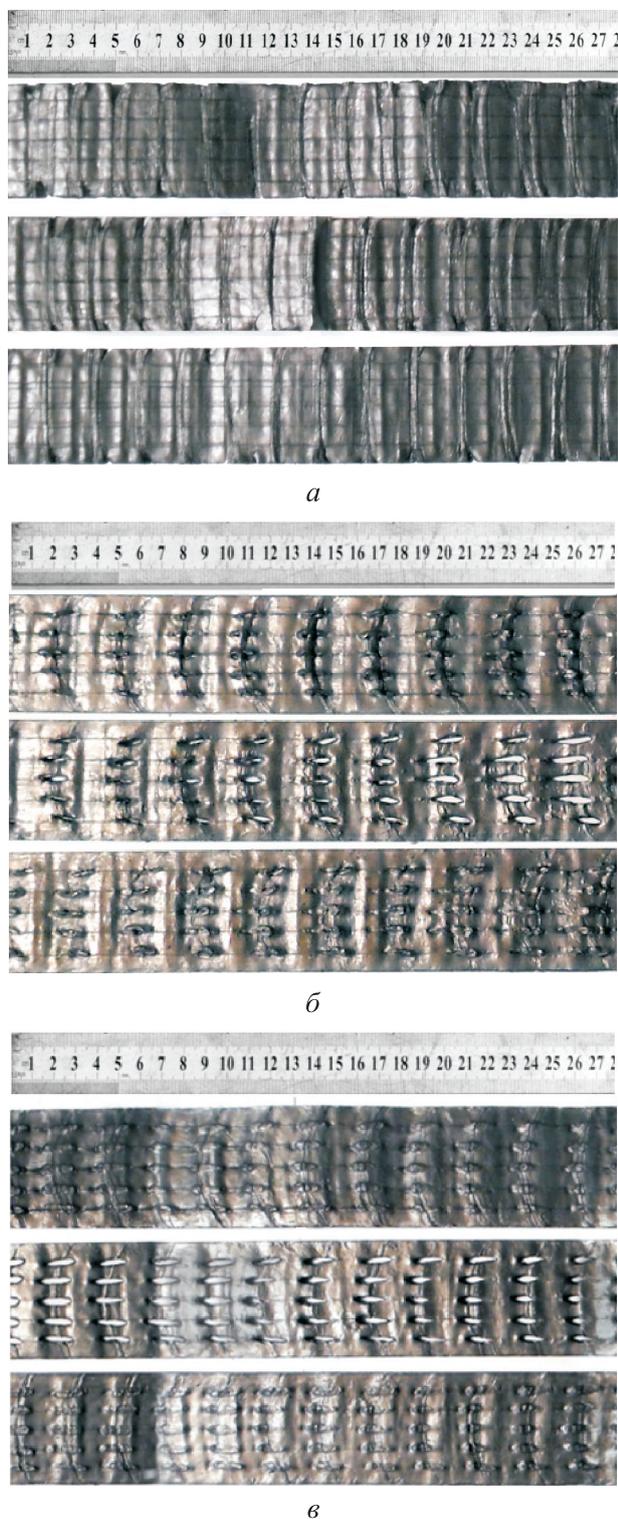


Рис. 3. Внешний вид слоев первого (а), второго (б) и третьего (в) образцов после деформации

Видно, что картина искажения ячеек делительной сетки во всех слоях трех образцов аналогичная: преобладает деформация в продольном направлении. Шаг между поперечными линиями сетки в среднем увеличился с 10 до 28 мм. Искажение формы ячеек делительной сетки в большей степени проявляется по краям пластин, составляющих пакет. Поперечные линии сетки изогнулись и приняли форму дуг с вершинами на продольной оси образца, направленными в сторону его выхода из кристаллизатора.

Таким образом, по мере удаления ячеек от оси образца, они все более принимают форму параллелограмма. Изменение расстояния между соседними продольными линиями сетки не превышает 0,25 мм от первоначального, что позволяет представить схему деформации образца как результат удлинения с дополнительным сдвигом.

Внешний вид слоев первого образца после деформации показан на рис. 3, а. Общая длина образца увеличилась примерно в 2,6 раза и стала равной 720 мм. Толщина слоев уменьшилась в среднем в 2,9 раза (до 1,4 мм).

Толщина каждого из слоев второго образца (см. рис. 3, б) в среднем уменьшилась в 2,5 раза. Удлинение образца составило примерно 300 %. Общая длина образца после деформации достигла 830 мм.

Толщина каждого из слоев третьего образца (см. рис. 3, в), как и у второго, в среднем уменьшилась в 2,5 раза. Удлинение образца составило примерно 260 %. Общая длина образца после деформации стала равной 740 мм.

Так как кристаллизатор УВЛДМ имеет две плоскости симметрии (продольную и поперечную), и процесс деформирования металлоизделия осуществляется циклически с шагом подачи 20 мм, искажения сетки образца измеряли для двух поперечных рядов ячеек, ограниченных его продольной линией симметрии и тремя поперечными линиями, характеризующими шаг подачи. Ряды ячеек выбирали из области образца, где процесс деформирования стал установившимся (девятый и десятый ряды).

Схемы расположения ячеек координатной сетки на сплошном и перфорированном слоях, построенные после испытания по результатам анализа искажения делительных сеток на слоях образцов, приведены на рис. 4, а и б.

Для оценки деформации, возникающей по всей толщине образца в калибрующем участке, брали среднее значение компонент деформации

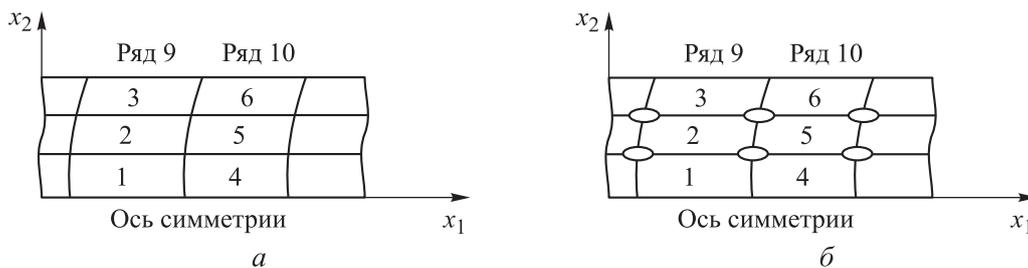


Рис. 4. Схемы расположения ячеек координатной сетки на сплошном (а) и перфорированном (б) слоях

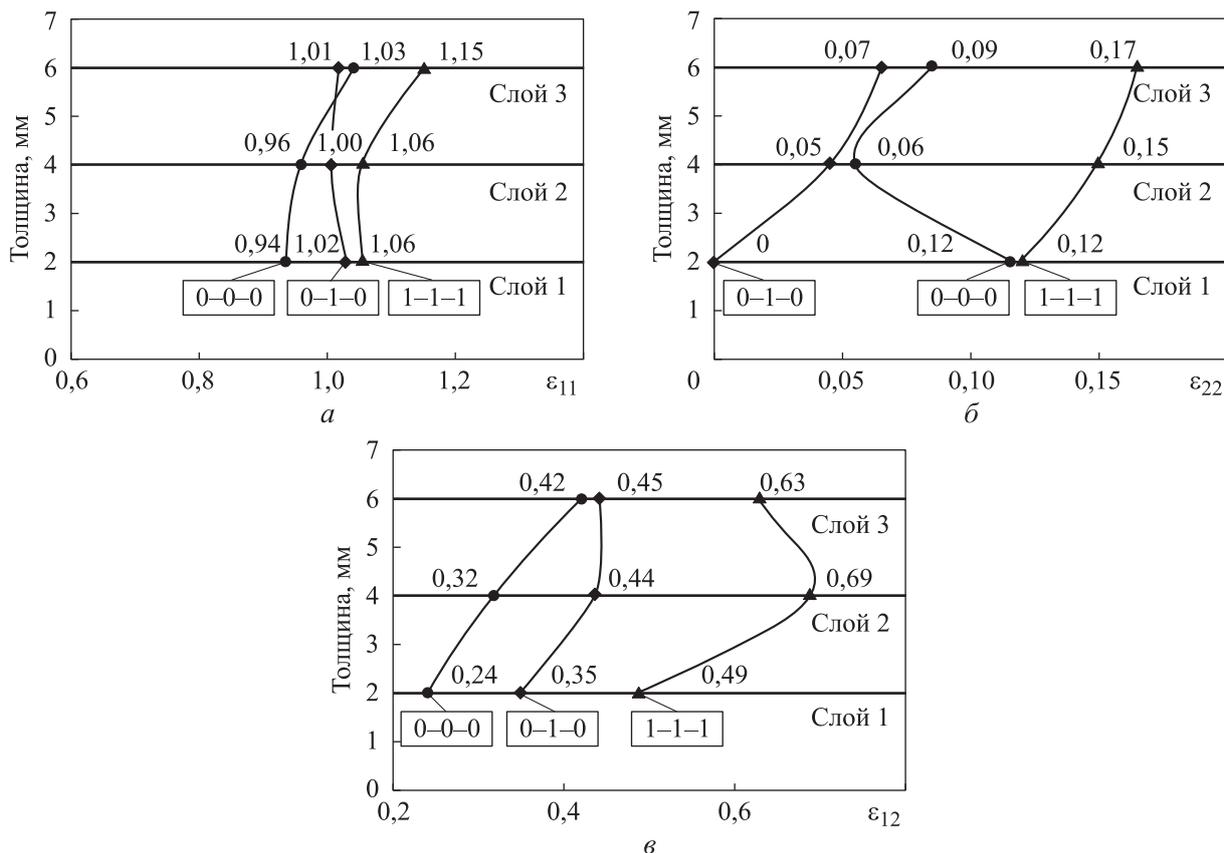


Рис. 5. Распределение компонент деформаций по толщине первого (а), второго (б) и третьего (в) образцов

по двум соседним ячейкам (№ 1 в девятом ряду и № 4 в десятом ряду) в каждом слое образца и строили кривые.

Компоненты и интенсивность деформаций рассчитывали по методике Зибеля [17]. Результаты исследования в графическом виде приведены на рис. 5.

Как видно из рисунка, характер деформации по ширине образца неодинаковый. По оси образца происходит чистое вытягивание. По мере удаления от оси к периферии степень деформации возрастает, что обусловлено наличием дополнительных сдвиговых деформаций τ , которые также увеличиваются от центра к периферии.

Максимальные усилия, создаваемые подвижными боковыми стенками кристаллизатора УВЛДМ, наблюдаются при деформировании образца третьего типа и составляют 212,3 кН/м. Для деформирования образца первого типа требуется почти в 3 раза меньшее усилие (79,5 кН/м).

Выводы

1. Проведено натурное моделирование деформирования заготовок с различными расположением и степенью пористости при циклическом воздействии на них подвижных стенок кристаллизатора УВЛДМ.

2. Анализ полученных результатов показал, что при равных условиях степени деформирования образцов трех типов характер искажения ячеек делительной сетки всех их слоев аналогичен с явным преобладанием деформации в продольном направлении (направлении выхода заготовки). Слои, расположенные на осевой линии образцов, испытывают равномерное продольное растяжение (удлинение), а слои,

находящиеся в непосредственном контакте с инструментом деформирования, — растяжение (удлинение) с дополнительным сдвигом. Максимальные усилия, создаваемые подвижными стенками кристаллизатора УВЛДМ, наблюдались при деформировании образца третьего типа и составили 212,3 кН/м. Для деформирования образца первого типа потребовалось почти в 3 раза меньшее усилие (79,5 кН/м).

Литература

- [1] Крушенко Г.Г. Получение и применение пористых металлических материалов в технике. *Вестник СГАУ*, 2012, № 5, с. 181–184.
- [2] Терехин Н.В., Черноглазов П.А. Изучение перспектив использования пористых материалов. *XXIV Туполевские чтения*. Т. 1. Казань. Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019, с. 340–342. EDN: RJBJSJ.
- [3] Аминова Г.А., Кузнецов В.Г., Исагилова А.И. и др. Металлическая пена на основе благородных металлов. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, № 10, с. 226–227.
- [4] Старовойтенко Е.И. Пеноалюминиевые гранулы — перспективы производства и промышленного применения нового пористого материала. *Технология легких сплавов*, 2006, № 1–2, с. 218–221.
- [5] Shiomi M., Imagama S., Osakada K. et al. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, no. 9, pp. 1203–1208, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.006>
- [6] Stoebener K., Rausch G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics. *J. Mater. Sci.*, 2009, vol. 44, no. 6, pp. 1506–1511, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2786-8>
- [7] Потянихин Д.А., Квашнин А.Е. Новые конструктивные решения устройства для реализации совмещенных процессов литья и деформации металлов. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2022, № 5, с. 101–105, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2022-61-101>
- [8] Александров С.Ю. Моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора установки непрерывной разливки стали при свободно вращающемся погружном стакане. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2021, № 3, с. 4–7, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-4>
- [9] Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Потянихин Д.А. и др. Теоретическое моделирование процессов деформации металлов на литейно-ковочном модуле новой модификации. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния*, 2022, № 2, с. 89–98, doi: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2022.52.2.010>
- [10] Соснин А.А., Черномас В.В. 3D моделирование установки горизонтального литья и деформации металла в программной среде T-FLEX. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2013, № 12, с. 25–29.
- [11] Черномас В.В., Севастьянов Г.М., Севастьянов А.М. и др. Экспериментальное определение энергосиловых параметров и компонент деформации при циклическом формоизменении материала. *Обработка металлов*, 2015, № 1, с. 33–41.
- [12] Кошеленко А.С., Жедь О.В., Солис Пинарготе Нестор Вашингтон. Экспериментальное исследование методом делительных сеток деформированного состояния дорнованного отверстия. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2013, № 2, с. 9–18.
- [13] Ларин С.Н., Исаева А.Н., Романов П.В. Оценка деформированного состояния заготовки при вытяжке с утонением стенки. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2021, № 3, с. 19–26.
- [14] Куфарев Г.Л., Гольдшмидт М.Г., Говорухин В.А. Делительные сетки для экспериментального изучения больших пластических деформаций. *Известия ТПУ*, 1976, с. 79–84.

- [15] Дель Г.Д., Новиков Н.А. *Метод делительных сеток*. Москва, Машиностроение, 1979. 144 с.
- [16] Периг А.В., Бондаренко С.И., Бондаренко Е.А. Экспериментально-теоретический анализ геометрических особенностей равноканального пластического течения при угловом прессовании материалов по маршруту С. *Письма о материалах*, 2012, т. 2, № 2, с. 103–106.
- [17] Шестаков Н.А., Власов А.В. *Расчеты процессов обработки металлов давлением в MathCAD*. Москва, Изд-во МГИУ, 2008. 342 с.

References

- [1] Krushenko G.G. Manufacture and application of porous metallic materials in engineering. *Vestnik SGAU*, 2012, no. 5, pp. 181–184. (In Russ.).
- [2] Terekhin N.V., Chernoglazov P.A. [Study of the prospects of using porous materials]. *XXIV Tupolevskie chteniya*. Т. 1 [XXIV Tupolev Readings. Vol. 1]. Kazan. Izd-vo IP Sagieva A.R., 2019, pp. 340–342. EDN: RBJCJ. (In Russ.).
- [3] Aminova G.A., Kuznetsov V.G., Ismagilova A.I. et al. Metallic foam based on noble metals. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 10, pp. 226–227. (In Russ.).
- [4] Starovoytenko E.I. Aluminium foam granules - prospects for production and industrial application of a new porous material. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2006, no. 1–2, pp. 218–221. (In Russ.).
- [5] Shiomi M., Imagama S., Osakada K. et al. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, no. 9, pp. 1203–1208, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.006>
- [6] Stoebener K., Rausch G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics. *J. Mater. Sci.*, 2009, vol. 44, no. 6, pp. 1506–1511, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2786-8>
- [7] Potyanikhin D.A., Kvashnin A.E. New constructive decisions for the implementation of combined processes of casting and deformation of metals. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amour State Technical University], 2022, no. 5, pp. 101–105, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2022-61-101> (in Russ.).
- [8] Aleksandrov S.Yu. Modeling of the process of filling with liquid metal of a continuous steel casting installation crystallizer with a free-boundary rotating submersible tank. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amour State Technical University], 2021, no. 3, pp. 4–7, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-51-4>
- [9] Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Potyanikhin D.A. et al. Theoretical modeling of metal deformation processes on a casting and forging module of a new modification. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Ser. Mekhanika predelnogo sostoyaniya* [Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Series: Mechanics of Limit State], 2022, no. 2, pp. 89–98, doi: <https://doi.org/10.37972/chgpu.2022.52.2.010> (in Russ.).
- [10] Sosnin A.A., Chernomas V.V. 3D simulation of the unit for horizontal casting and deformation of metal in the T-FLEX software environment. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure], 2013, no. 12, pp. 25–29. (In Russ.).
- [11] Chernomas V.V., Sevastyanov G.M., Sevastyanov A.M. et al. Experimental determination of energy-power parameters and components of deformation during cyclic forming of material. *Obrabotka metallov* [Metal Working and Material Science], 2015, no. 1, pp. 33–41. (In Russ.).
- [12] Koshelenko A.S., Zhed O.V., Solis Pinargote Nestor Washington. An experimental study by method of separatory grids of a deformed state of a mandrel opening. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernyye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2013, no. 2, pp. 9–18. (In Russ.).
- [13] Larin S.N., Isaeva A.N., Romanov P.V. Evaluation of the deformed state of the workpiece during drawing with thinning of the wall. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2021, no. 3, pp. 19–26. (In Russ.).

- [14] Kufarev G.L., Goldshmidt M.G., Govorukhin V.A. Dividing grids for experimental study of large plastic deformations.. *Izvestiya TPU*, 1976, pp. 79–84. (In Russ.).
- [15] Del G.D., Novikov N.A. *Metod delitelnykh setok* [Method of dividing grids]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 144 p. (In Russ.).
- [16] Perig A.V., Bondarenko S.I., Bondarenko E.A. An experimental and theoretical analysis of geometric features of equal channel plastic flow during angular extrusion of materials via route C. *Pisma o materialakh* [Letters on Materials], 2012, vol. 2, no. 2, pp. 103–106. (In Russ.).
- [17] Shestakov N.A., Vlasov A.V. *Raschety protsessov obrabotki metallov davleniem v MathCAD* [Calculations of metal forming processes in MathCAD.]. Moscow, Izd-vo MGIU Publ., 2008. 342 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Информация об авторах

ЧЕРНОМАС Вадим Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теория и методика технологического образования». ФГБОУ ВО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет» (681000, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Кирова, д. 17, корп. 2, e-mail: userman10@mail.ru).

ЩЕЛКУНОВ Евгений Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: galinamarina5@mail.ru).

Information about the authors

CHERNOMAS Vadim Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Theories and Methods of Technological Education. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Amur State University of Humanities and Pedagogy (681000, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Kirova St., Bldg. 17, Block 2, e-mail: userman10@mail.ru).

SHCHELKUNOV Evgeniy Borisovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amur State University (681013, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Lenina Ave., Bldg. 27, e-mail: galinamarina5@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Черномас В.В., Щелкунов Е.Б. Натурное моделирование деформирования пористых материалов в кристаллизаторе установки вертикального литья и деформации металла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 23–30.

Please cite this article in English as:

Chernomas V.V., Shchelkunov E.B. Natural simulation of deformation in the porous materials in a crystallizer of the vertical casting and metal deformation system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 23–30.