

Березин И.М., Залазинский А.Г., Нестеренко А.В., Быкова Т.М. Моделирование процесса двухстороннего прессования металлического порошка в пресс-форме с плавающей матрицей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 3. С. 5-16. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.01

Berezin I.M., Zalazinskii A.G., Nesterenko A.V., Bykova T.M. Simulation of metal powder bidirectional compression in a pressing tool with a floating die. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 3, pp. 5-16. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.01



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.01

УДК 621.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУХСТОРОННЕГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА В ПРЕСС-ФОРМЕ С ПЛАВАЮЩЕЙ МАТРИЦЕЙ

И.М. Березин, А.Г. Залазинский, А.В. Нестеренко, Т.М. Быкова

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, Екатеринбург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 4 апреля 2019 г.

Принята: 14 августа 2019 г.

Опубликована: 17 октября 2019 г.

Ключевые слова:

порошковый материал, двухстороннее прессование, полиуретановые пружины, модель Муни–Ривлина, условие текучести Друкера–Прагера, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается процесс двухстороннего прессования порошкообразного губчатого титана в пресс-форме с плавающей матрицей. В качестве материала для исследования выбран порошкообразный отсев губчатого титана марки ТГ-100 по ГОСТ 17746–96 фракцией – 3+1 мм. Для реализации процесса двухстороннего прессования предложена новая конструкция пресс-формы. Одновременное движение верхнего и нижнего пуансонов относительно разъёмной матрицы достигается путем размещения матрицы между двух полиуретановых пружин. Пресс-форма обеспечивает эффективное прессование за счет реализации синхронного без колебаний перемещения нижнего и верхнего пуансонов относительно разъёмной матрицы, а также равномерное разгружение прессовки со всех сторон, что исключает появление трещин расслоения. Численное моделирование процесса выполнено с использованием конечно-элементного анализа. При моделировании предполагали, что элементы пресс-формы обладают свойствами абсолютно жесткого тела. Материал порошкового материала рассматривается как сплошная сжимаемая упругопластическая среда с изначально изотропными свойствами. Условие пластического течения порошкообразного материала описано модифицированной моделью текучести Друкера–Прагера. Скорость пластической деформации пропорциональна напряжению в текущий момент, напряженное состояние определяет мгновенные приращения компонент пластической деформации. Выполняется закон ассоциированного пластического течения. В качестве модели материала (полиуретан СКУ-7Л) пружинных элементов использована модель гиперупругой среды Муни–Ривлина. В результате моделирования получено расчетное распределение плотности в сечении уплотняемой порошковой заготовки при разном давлении прессования. Построены графики зависимости средней относительной плотности порошковых заготовок от давления прессования. Для брикетов, полученных при различном давлении прессования (100 и 500 МПа), выполнили металлографическое исследование микроструктуры поверхности продольных сечений образцов. Исследовано изменение формы и размеров пор в нижней и верхней частях брикетов. Для оценки микромеханических свойств полученных заготовок осуществлено кинетическое микроиндентирование поверхности шлифов продольных осевых сечений, что позволило определить значения микротвердости, характеристику ползучести и приведенный модуль упругости. Показано, что предлагаемая конструкция пресс-формы позволяет получать заготовки, обладающие более равномерным распределением плотности в сравнении с изготовленными путем одностороннего прессования.

© ПНИПУ

© Березин Иван Михайлович – к.т.н., н.с., e-mail: berezin@imach.uran.ru, ID: [0000-0002-8674-3352](https://orcid.org/0000-0002-8674-3352).

Залазинский Александр Георгиевич – д.т.н., г.н.с., e-mail: agz@imach.uran.ru, ID: [0000-0001-8352-5475](https://orcid.org/0000-0001-8352-5475)

Нестеренко Антон Владимирович – к.т.н., с.н.с., e-mail: nav@imach.uran.ru, ID: [0000-0002-7010-6260](https://orcid.org/0000-0002-7010-6260)

Быкова Татьяна Михайловна – к.т.н., н.с., e-mail: tatiana_8801@mail.ru, ID: [0000-0002-8888-6410](https://orcid.org/0000-0002-8888-6410)

Ivan M. Berezin – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: berezin@imach.uran.ru, ID: [0000-0002-8674-3352](https://orcid.org/0000-0002-8674-3352).

Alexander G. Zalazinskii – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: agz@imach.uran.ru,

ID: [0000-0001-8352-5475](https://orcid.org/0000-0001-8352-5475)

Anton V. Nesterenko – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: nav@imach.uran.ru, ID: [0000-0002-7010-6260](https://orcid.org/0000-0002-7010-6260)

Tatiana M. Bykova – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: tatiana_8801@mail.ru, ID: [0000-0002-8888-6410](https://orcid.org/0000-0002-8888-6410)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

SIMULATION OF METAL POWDER BIDIRECTIONAL COMPRESSION IN A PRESSING TOOL WITH A FLOATING DIE

I.M. Berezin, A.G. Zalazinskii, A.V. Nesterenko, T.M. Bykova

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 4 April 2018
Accepted: 14 August 2019
Published: 17 October 2019

Keywords:

powder material, bidirectional compression, rubber springs, Mooney-Rivlin model, Modified Drucker-Prager Cap model, numerical simulation.

ABSTRACT

The process of bidirectional compression of a powder titanium sponge in a pressing tool with a floating die is considered. The paper studies powder screenings of titanium sponge of TG-100 grade according to GOST 17746-96 with a fraction of $-3 + 1$ mm. A new design of the pressing tool is proposed to implement the process of bidirectional compression. The simultaneous movement of the upper and lower punches relative to the sectional die is achieved by placing the die between two rubber springs. The pressing tool provides an efficient compression due to the implementation of a synchronous vibration-free movement of the lower and upper punches relative to the sectional die, as well as a uniform compression unloading on all sides, which eliminates the occurrence of splitting cracks. Numerical simulation of the process was performed using a finite element analysis. In the simulation, it was assumed that the elements of the pressing tool have properties of an absolutely rigid body. The powder material is considered as a continuous compressed elastoplastic medium with initial isotropic properties. The powdered material yield condition is described by the Modified Drucker-Prager Cap yield model. The rate of plastic deformation is proportional to the voltage at the current moment, the stress state determines the instantaneous increments of plastic deformation components. The associated plastic flow rule is fulfilled. Mooney–Rivlin hyperelastic material model was used as a model of the material (SKU-7L rubber) of the spring elements. As a result of the simulation, the calculated density distribution in the cross-section of the compacted powder workpieces at different compression pressures was obtained. The dependence of the average relative density of the powder workpieces on the compression pressure was investigated. For the compacts obtained at different compression pressures (100 and 500 MPa), a micrographic study of the microstructure of the samples longitudinal sections surfaces was performed. The change in the shape and size of pores in the lower and upper parts of compacts was studied. In order to assess micromechanical properties of the obtained workpieces, kinetic microindentation of thin section surfaces of the longitudinal axial sections was carried out, which allowed determining the microhardness values, the creep characteristic, and the reduced modulus of elasticity. It is shown that the proposed design of the pressing tool allows obtaining workpieces with a more uniform density distribution in comparison with those manufactured using monodirectional compression.

© PNRPU

Введение

Наиболее распространенными способами уплотнения порошкообразных материалов являются процессы одностороннего и двухстороннего прессования в закрытой пресс-форме. Особенности напряженно-деформированного состояния при прессовании порошка определяются действием сил трения порошка на поверхности деформирующего инструмента. Возникающие при одностороннем прессовании напряжения на контактных поверхностях приводят к неоднородному распределению плотности деформируемого материала и существенной неоднородности физико-механических и эксплуатационных свойств прессуемых изделий [1]. При одностороннем прессовании наибольшая плотность наблюдается в периферийных верхних участках, а наименьшая – в аналогичных нижних участках прессуемых брикетов. При этом в результате технологической наследственности процессов пластической обработки дальнейшее использование порошковых заготовок предполагает учет истории нагружения и схемы напря-

женного состояния уплотняемого материала при деформации [2]. Решения проблемы повышения плотности и равномерности распределения свойств заготовок из порошковых материалов следует ожидать на основе совершенствования и комплексного анализа технологических процессов пластического деформирования путем создания адекватных математических моделей, в том числе с применением методов компьютерного моделирования.

Одним из наиболее простых и технологически оправданных методов получения более равномерного распределения плотности по объему прессуемой заготовки в закрытой пресс-форме является использование двухстороннего прессования. Такой способ может быть осуществлен либо на специальных гидравлических прессах, допускающих автономное перемещение различных пресс-элементов, либо с применением пресс-форм с подпружиненной плавающей матрицей [3, 4]. Суть метода заключается в том, что верхний пуансон, перемещаясь вниз, уплотняет сильнее слой порошка, находящийся непосредственно под ним. Поэтому

в верхней части пресс-формы между стенками матрицы и прессуемым порошком возникают большие силы трения, чем в ее нижней части, и благодаря разнице этих сил происходит передвижение подпружиненной матрицы вместе с верхним пуансоном до тех пор, пока силы трения внизу пресс-формы не превысят силы трения в ее верхней части. Тогда вновь начинает перемещаться верхний пуансон. Поочередное перемещение верхнего и нижнего пуансонов относительно матрицы продолжается до момента завершения процесса прессования заготовки. К недостаткам указанной конструкции пресс-формы следует отнести прерывистый режим работы, вызванный уравниванием сил трения между заготовкой и подпружиненной матрицей в процессе прессования, что, в свою очередь, снижает качество получаемых изделий. Указанный недостаток конструкции пресс-формы предлагается исключить за счет установки плавающей матрицы между двух полиуретановых пружин одинаковой жесткости.

Для исследования процесса двухстороннего прессования металлического порошка использован отсев губчатого титана. Интерес к титану как конструкционному материалу объясняется уникальным сочетанием в нем физико-механических свойств и значительными запасами в земной коре. Вместе с тем применению титана в современной технике препятствует высокая себестоимость металла, обусловленная многостадийностью и периодичностью применяемого в промышленности процесса Кролла. Процесс характеризуется высокими энергетическими и трудовыми затратами, при этом коэффициент использования металла обычно не превышает 0,3, в связи с чем большое количество металла уходит в безвозвратные отходы [5]. Такая технология вполне оправдана при производстве титановых изделий особо ответственного назначения – для авиации и космоса. В то же время для многих изделий со стандартными требованиями к механическим свойствам можно использовать другие технологии, позволяющие существенно снизить себестоимость готовой продукции. По оценке [6], в стоимости изделий из титана доля стоимости исходного сырья – титановой губки составляет менее 25 процентов. Очевидно, что сфера применения титана в промышленности могла бы быть существенно расширена путем снижения стоимости титановых изделий, в том числе за счет использования дешевого исходного порошкообразного сырья в виде порошкообразной титановой губки и порошковых композиций на ее основе для изготовления заготовок изделий неотчетливого назначения преимущественно методами пластического деформирования.

Исследования по изготовлению сравнительно недорогих изделий из отсева титановой губки, механолегированных сплавов на основе дешевых порошков титана, стружечных отходов, порошков, полученных переработкой отходов промышленного производства, впервые начали выполняться в США с начала 50-х годов [7, 8]. Несколько позже в СССР предприняты попытки приме-

нения методов порошковой металлургии для изготовления фильтров в виде пористых труб [9, 10], полученных путем прессования отсева магнийтермического губчатого титана. Комплексное научное исследование по освоению технологии получения высокоплотных изделий и полуфабрикатов из титановой губки, минуя операции выплавки слитков, впервые выполнено в СКБ гидроимпульсной техники СО АН СССР [11–14]. В начале 1990-х годов в Центральном научно-исследовательском институте материалов (ЦНИИМ) в рамках проекта № 0717 проводились исследования, направленные на создание технологии изготовления титановых полуфабрикатов из титановой стружки [15–20]. В результате совместного проекта Института машиноведения УрО РАН и Sandia National Laboratories (США) разработаны научные основы технологий прессования, полунепрерывного выдавливания и волочения проволоочной заготовки непосредственно из титановой губки [21–23]. Компания NORSK Titanium (Норвегия) в 2012 г. получила два патента на производство сварочной проволоки непосредственно из титановой губки [24, 25]. Известны работы, в которых титановая губка используется как исходный материал при производстве титановых сплавов методами механического легирования [26–29]. Относительно недавно опубликованы результаты научно-исследовательской работы, выполненной при поддержке Совета по естественным наукам и инженерным исследованиям Канады (NSERC – Automotive Partnership Canada) [30]. Указанный проект направлен на анализ механизма уплотнения и разработку модели пластического течения порошкообразного губчатого титана при компактировании в закрытом контейнере. На сегодняшний день в России и постсоветском пространстве исследования процессов пластической обработки титановой губки ведутся в Институте машиноведения УрО РАН [31–36], Уральском федеральном университете [37, 38], Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины [39, 40]. Особый интерес представляет совместный проект Института физики металлов УрО РАН и Уральского института травматологии и ортопедии имени В.Д. Чаклина [41, 42].

Целью данной работы является экспериментальное исследование и имитационное моделирование процесса двухстороннего прессования порошковой заготовки в пресс-форме с плавающей матрицей для определения основных технических параметров и проверки работоспособности предлагаемой конструкции устройства.

1. Материал и методы исследования

В качестве материала для исследования процесса двухстороннего прессования порошка в пресс-форме с плавающей матрицей выбран порошкообразный отсев губчатого титана марки ТГ-100 по ГОСТ 17746–96 фракцией –3+1 мм. Частицы губчатого титана не подвергали какой-либо дополнительной обработке (просеивание, вторичное дробление, сфероидизация, очист-

ка и др.). Для экспериментальных исследований использовали сервогидравлическую машину Instron 8801.

Для реализации процесса двухстороннего прессования авторами работы предложена новая конструкция пресс-формы с плавающей матрицей [4]. Матрица является сборной и состоит из двух разъемных лепестков, устанавливаемых в корпус пресс-формы. Контактные поверхности корпуса и лепестков разъемной матрицы выполнены под конус. Схема процесса двухстороннего прессования показана на рис. 1. В данном случае наилучшее распределение плотности при двухстороннем прессовании ожидается, если перемещение плавающей матрицы L_2 при неподвижном нижнем пуансоне будет вдвое меньше величины перемещения верхнего подвижного пуансона L_1 , так как верхний и нижний пуансоны должны перемещаться на примерно равные расстояния относительно матрицы. Пресс-форма снабжена двумя пружинными элементами. При этом верхний пружинный элемент одним концом упирается во фланец подвижного пуансона, а другим концом – в верхний торец матрицы. Нижний пружинный элемент одним концом упирается во фланец неподвижного пуансона, а другим – в нижний торец матрицы. В качестве материала пружинных элементов использован полиуретан СКУ-7Л, твердостью 64 ед. по А. Шору. Геометрические размеры $D = 32$ мм, $d = 10,5$ мм, $H_0 = 20$ мм, что соответствует ГОСТ 22201–83. Пружина 1086-1307 (исполнение 1).

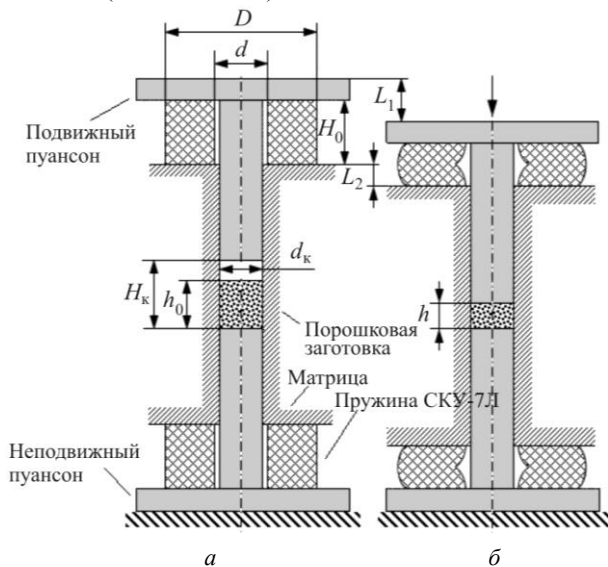


Рис. 1. Схема процесса двухстороннего прессования при начальном (а) и конечном (б) положении пресс-формы

Fig. 1. Diagram of the double-sided pressing at the initial (a) and final (b) position of the mold

Принцип работы пресс-формы следующий. Под действием подвижного пуансона порошок прессуется в верхней части матрицы. Одновременно с этим верхний пуансон через пружинный элемент давит на матрицу, в результате чего последняя, опираясь на нижний пружинный элемент, перемещается вниз вдоль направляющих колонок, обеспечивая прессование порошка

в нижней ее части. После окончания уплотнения верхний пуансон поднимают, прессовка упруго расширяется вверх и в стороны. Лепестки разъемной матрицы под действием сил трения и бокового давления перемещаются вверх по наклонным поверхностям корпуса и расходятся в стороны, освобождая прессовку. Пресс-форма обеспечивает эффективное прессование за счет реализации синхронного без колебаний перемещения нижнего и верхнего пуансонов относительно разъемной матрицы, а также равномерное разгрузку прессовки со всех сторон, что исключает появление трещин расслоения. При необходимости схема позволяет изменять величину перемещения матрицы за счет изменения жесткости используемых пружинных элементов.

Для имитационного моделирования процесса приняты следующие параметры и допущения. Радиус внутреннего канала матрицы $d_k = 10$ мм, высота рабочей камеры пресс-формы $H_k = 26$ мм, высота исходной порошковой заготовки в расчетной модели $h_0 = 14$ мм, L_1 – перемещение верхнего пуансона (жесткое нагружение). Высота заготовки после прессования $h = 8,4$ мм. Теоретическая плотность компактного титана $\rho_{теор} = 4540$ кг/м³. Начальная относительная плотность заготовки ($\rho_{отн} = 0,6$), принятая для вычислительных экспериментов, не равна насыпной плотности исследуемого порошкового материала. Задача решается в осесимметричной постановке. Использована модель внешнего трения Амонтона–Кулона при коэффициенте трения $\mu = 0,2$. Пресс-форма обладает свойствами абсолютно жесткого тела. Исследование механизма уплотнения губчатого титана производится при комнатной температуре. Материал порошка рассматривается как сплошная сжимаемая упругопластическая среда с изначально изотропными свойствами.

Скорость пластической деформации пропорциональна напряжению в текущий момент; напряженное состояние определяет мгновенные приращения компонент пластической деформации. Для определения приращений пластической деформации $d\epsilon_{ij}$ используется функция $\Phi(\sigma_{ij})$, называемая пластическим потенциалом. В этом случае уравнения пластического течения имеют вид: $d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \partial\Phi/\partial\sigma_{ij}$, где $d\lambda \geq 0$ – некоторый неопределенный малый скалярный множитель. Полагается, что функция пластичности и пластический потенциал совпадают, т.е. $f = \Phi$. При этом выполняется ассоциированный закон пластического течения: $d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij} = d\lambda \cdot \partial f/\partial\sigma_{ij}$.

Условие пластического течения порошкового материала описано модифицированной моделью текучести Друкера–Прагера (Modified Drucker–Prager Cap model). Методика, используемая для идентификации принятой модели текучести аналогичного порошкового материала, описана в работе [43]. Для описания упругих характеристик материала в исходном состоянии использованы следующие зависимости: коэффициент Пуассона пористого материала $\nu_{пм} = \nu \cdot \rho_{отн}$, модуль Юнга пористого материала $E_{пм} = E \cdot \rho_{отн}$. Здесь E и ν соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала в беспористом состоянии. Данные зависимости удовле-

творительно коррелируют с результатами исследования упругих характеристик пористых материалов, приведенных в работе [44]. Величины $\nu_{\text{пм}}$ и $E_{\text{пм}}$ не меняются в процессе уплотнения порошкового материала.

В качестве модели материала эластомера использована модель гиперупругой среды Муни–Ривлина [45]. Для гиперупругого материала Муни–Ривлина плотность энергии упругой деформации, т.е. отношение энергии U к тому объему V , в котором она заключена, постулируется в виде

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{\text{el}} - 1)^2, \quad (1)$$

где C_{10} , C_{01} – константы материала, определяющие параметры сдвиговых деформаций; D_1 – константа материала, определяющая сжимаемость материала ($D_1 = 0$ – эластомер несжимаем); I_1 , I_2 – инварианты тензора деформаций Коши–Грина; J^{el} – объемная упругая деформация.

Определение коэффициентов C_{10} и C_{01} используемого полиуретана осуществляли на основе экспериментальных данных, полученных в работе [46]. Поскольку в [46] отсутствует информация о фактической твердости испытываемого полиуретана, принято предположение о возможности введения поправочного коэффициента для C_{10} и C_{01} по аналогии с поправочным коэффициентом для полиуретана SKU-7Л разной твердости, указанным в ГОСТ 22201–83. На рис. 2 показаны графики зависимости коэффициентов C_{10} и C_{01} от твердости по А. Шору для полиуретана SKU-7Л. Знаком «o» указаны значения C_{10} и C_{01} в диапазоне твердости, рекомендуемом ГОСТ 22201–83 (76...86 ед.). Знаком «*» указаны значения коэффициентов для фактической твердости материала пружинных элементов (64 ед.), использованных в настоящей работе. Уравнения регрессии для кривых, представленных на рис. 2:

$$C_{01} = 0,088e^{0,0368H_A}, \quad (2)$$

$$C_{10} = 0,0376e^{0,0368H_A}. \quad (3)$$

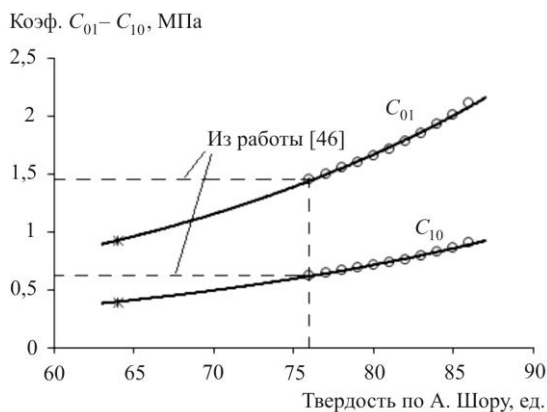


Рис. 2. График зависимости коэффициентов C_{10} и C_{01} от твердости полиуретана SKU-7Л

Fig. 2. The dependence of the coefficients C_{10} and C_{01} on hardness of polyurethane SKU-7L

Для проверки полученных значений коэффициентов C_{10} и C_{01} выполнено моделирование осадки полиуретановых пружин (2 шт. одновременно) и сравнение величины изменения усилия осадки пружинных элементов с экспериментальными значениями, полученными для SKU-7Л при твердости 64 ед. по А. Шору и регламентируемыми ГОСТ 22201–83 усилиями для аналогичной пружины 1086-1307 при твердости 76, 82, и 86 ед. На рис. 3 приведены графики зависимости усилия осадки пружины от деформации ε . Видно, что результаты, полученные путем моделирования, удовлетворительно коррелируют со значением усилия осадки, найденным экспериментально и требуемым ГОСТ 22201–83.

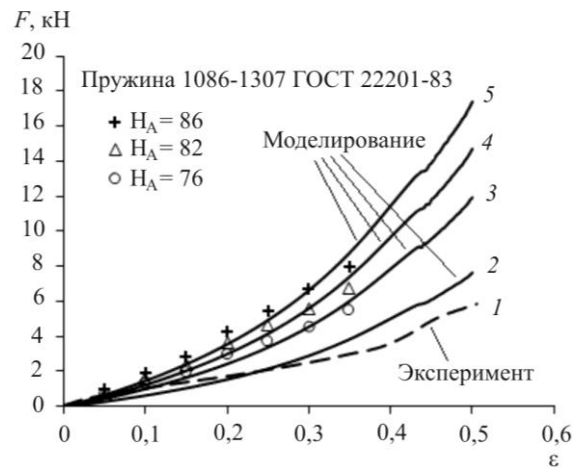


Рис. 3. Графики зависимости усилия осадки полиуретановых пружин от деформации при твердости материала по А. Шору: 1, 2 – 64 ед., 3 – 76 ед., 4 – 82 ед., 5 – 86 ед.

Fig. 3. Graphs of the dependence of the compression force of polyurethane springs on deformation with material hardness according to Shore A: 1, 2 – 64 units, 3 – 76 units, 4 – 82 units, 5 – 86 units

На рис. 4 приведено распределение максимальных значений главных компонент тензора деформаций в сечении пружинных элементов на разных этапах работы пресс-формы. Пунктирными линиями показано исходное положение элементов пресс-формы. На рис. 5 показана пресс-форма двухстороннего прессования, установленная на сервогидравлической машине Instron 8801.

Микроструктуру полученных порошковых заготовок исследовали на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21.

Микротвердость измеряли на инструментированном микротвердомере FISHERSCOPE 2000хум с системой кинетического микроиндентирования, что позволило определить значения микротвердости, характеристику ползучести, приведенный модуль упругости, из которого рассчитывали нормальный модуль упругости по формуле

$$E_{\text{упр}} = E(1 - \nu_{\text{пм}}^2), \quad (4)$$

где E – приведенный модуль упругости, $E_{\text{упр}}$ – нормальный модуль упругости; $\nu_{\text{пм}}$ – коэффициент Пуассона пористого материала.

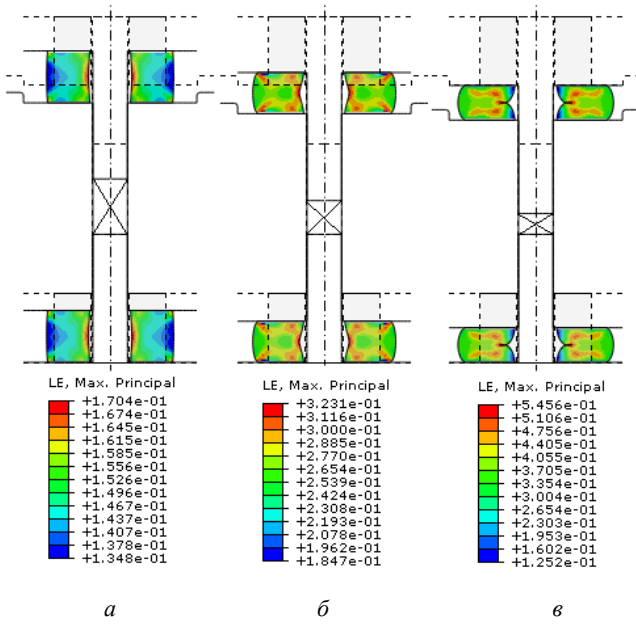


Рис. 4. Распределение максимальных главных компонент тензора деформаций в сечении пружинных элементов при перемещении пуансона: а – 10 мм; б – 16,2 мм; в – 20 мм

Fig. 4. The distribution of the maximum principal components of the strain tensor in the section of the spring elements when moving the punch: a) 10 mm, b) 16.2 mm, c) 20 mm

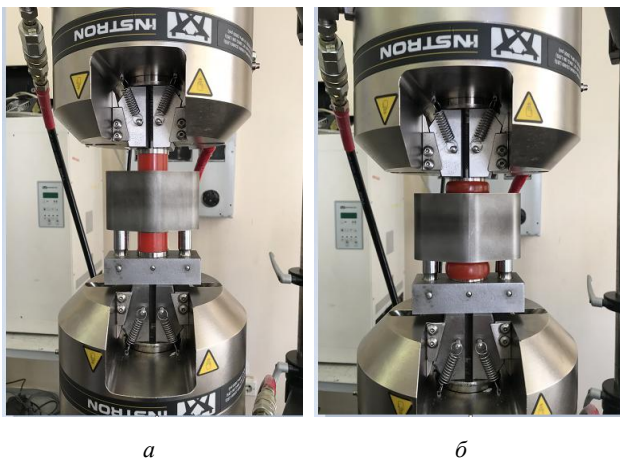


Рис. 5. Вид на пресс-форму в начальной (а) и конечной (б) стадиях прессования порошка

Fig. 5. View of the mold in the initial (a) and final (b) stages of powder pressing

Определена полная работа вдавливания индентора A , работа сил релаксации $A_{\text{рел}}$ и остаточного формоизменения $A_{\text{оф}}$. Запас пластичности φ оценивали по формуле

$$\varphi = \frac{A_{\text{оф}}}{A} 100\% \quad (5)$$

Ползучесть или indentation creep рассчитывали по формуле

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} 100\% \quad (6)$$

где C_{IT} – ползучесть, или indentation creep, характеризующая способность материала к формоизменению при постоянно действующей нагрузке; h_1 – начальная глубина внедрения индентора; h_2 – конечная глубина внедрения индентора.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 6. показано сравнение графиков зависимости величины усилия прессования исследуемого порошкового материала в пресс-форме с плавающей матрицей от перемещения пуансона, полученных моделированием и экспериментальным путем. Натурные испытания по прессованию начинали с насыпной плотности порошкообразного губчатого титана ($\rho_{\text{отн}} \approx 0,3...0,4$) для навесок массой 2 г. Моделирование осуществляли по схеме, приведенной на рис. 1, для заготовки с начальной относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 0,6$ и геометрическими размерами, определяемыми диаметром контейнера d_k и высотой H_0 , выбранной из условия равенства массы модельного материала с массой навесок для экспериментальных образцов. Выбор указанной начальной относительной плотности порошковой заготовки обоснован тем, что при моделировании использованы коэффициенты модели пластического течения порошкового материала, идентифицированные ранее для материала при $\rho_{\text{отн}} = 0,65$ и выше. На рис. 6 кривая, полученная моделированием, имеет два ярко выраженных участка, соединяемых между собой резким всплеском усилия прессования. Участок 1 соответствует этапу деформирования только пружинных элементов. На участке 2 происходит скачкообразное повышение усилия прессования с дальнейшим экспоненциальным ростом в связи с началом и развитием процесса прессования предварительно уплотненной порошковой заготовки в контейнере пресс-формы.

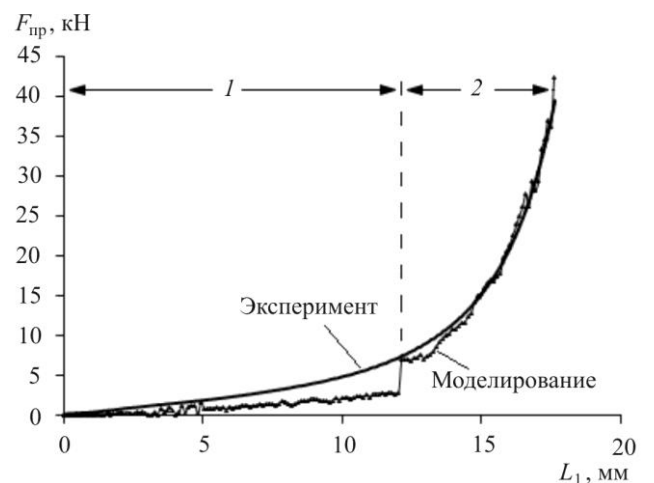


Рис. 6. Зависимость усилия прессования порошкообразного отсева губчатого титана в пресс-форме с плавающей матрицей от перемещения пуансона

Fig. 6. The dependence of the pressing force of powdered screenings of sponge titanium in a mold with a floating matrix on the movement of the punch

На рис. 7 приведена картина расчетного распределения плотности в сечении порошковой заготовки при различном давлении прессования в пресс-форме с плавающей матрицей.

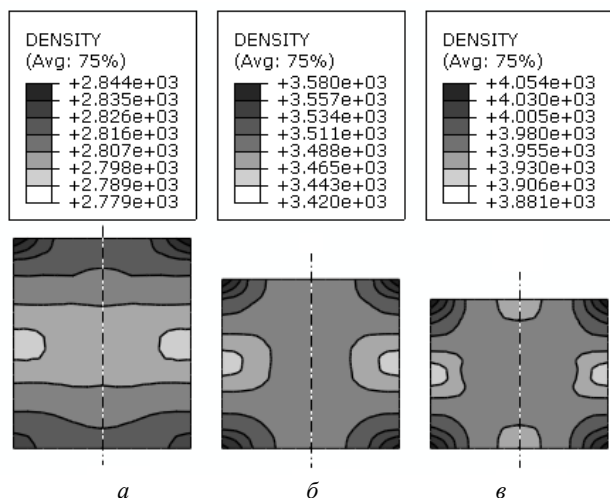


Рис. 7. Расчетное распределение плотности (кг/м^3) в сечении уплотняемой порошковой заготовки при давлении прессования $P_{\text{пр}}$: а – 140 МПа; б – 330 МПа; в – 500 МПа

Fig. 7. The calculated density distribution (кг/м^3) in the section of the compacted powder billet at a pressing pressure $P_{\text{пр}}$: а) 140 МПа, б) 330 МПа, в) 500 МПа

В радиальном направлении, в слоях, прилегающих к верхнему и нижнему пуансонам, плотность повышается от центра к периферии, тогда как в слое, находящемся в средней части заготовки, наоборот, она возрастает от периферии к центру. Наиболее плотные участки деформируемого материала сосредоточены на стыке пуансонов и боковой поверхности матрицы. Участки с наименьшей плотностью расположены в слоях материала, лежащих в срединной части заготовки, при этом линии уровня плотности близки к горизонтальным. По мере приближения к торцевым участкам и уменьшении отношения высоты заготовки к диаметру в процессе прессования послойно-горизонтальное уплотнение нарушается. Неоднородное распределение плотности по объему порошковой заготовки обусловлено действием сил внешнего трения деформируемого материала о контактирующие с ним поверхности элементов пресс-формы. Разница между наибольшим и наименьшим значением плотности порошковой заготовки при давлении прессования в пресс-форме с плавающей матрицей, равном 500 МПа, составляет 4,3 % (рис. 7, в). Ранее, в работе [36] авторами исследован процесс одностороннего прессования в закрытой пресс-форме аналогичного порошкового материала. Картина распределения плотности по сечению брикета существенно отличалась от показанной на рис. 7. В случае одностороннего прессования при сопоставимых давлениях на заготовку со стороны пуансона слои материала, сосредоточенные на дне глухого контейнера (матрицы), имели значительно более низкую относительную плотность в сравнении

с верхней частью. В некоторых случаях наблюдалось осыпание нижней кромки брикета, что свидетельствует о недопустимо низком механическом сцеплении частиц порошкового материала.

На рис. 8 показаны графики зависимости средней относительной плотности порошковых заготовок от давления прессования, полученные экспериментально (кривые 1, 2) и на основе моделирования (кривые 3, 4).

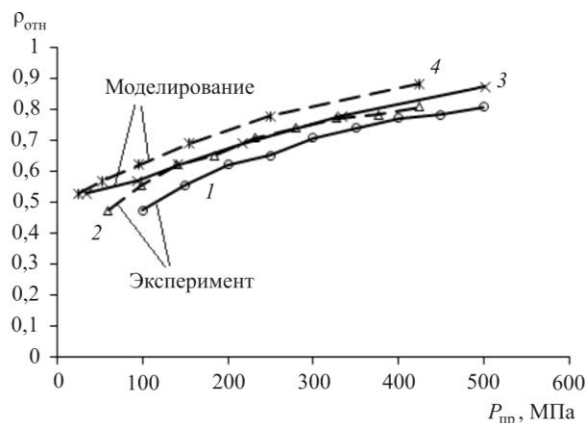


Рис. 8. Графики зависимости относительной плотности порошковых заготовок от давления прессования $P_{\text{пр}}$: 1, 3 – в пресс-форме с плавающей матрицей; 2, 4 – без учета усилия деформации пружинных элементов (обычное двухстороннее прессование)

Fig. 8. Graphs of the relative density of the powder billets on the pressing pressure $P_{\text{пр}}$: 1, 3 are in the mold with a floating matrix; 2, 4 are without taking into account the deformation force of the spring elements (conventional double-sided pressing)

Для брикетов, полученных при различном давлении прессования (100 и 500 МПа) выполнили металлографическое исследование микроструктуры поверхности продольных сечений образцов. Исследовали изменение формы и размеров пор в нижней и верхней частях брикетов. На рис. 9 показана схема выбора зон для исследования микроструктуры продольного сечения спрессованного брикета.

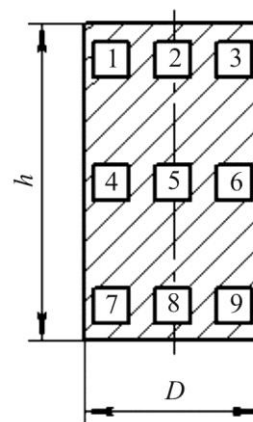


Рис. 9. Схема выбора зон в поперечном сечении брикета для исследования микроструктуры

Fig. 9. The scheme of choice of zones in the cross section of the bar for the study of microstructure

Результаты выполненного исследования позволили сделать вывод, что уплотнение прессуемого материала в верхней и нижней частях брикета проходит с примерно одинаковой интенсивностью (рис. 10). Для анализа распределения плотности по высоте брикета сравнили структуру на участках 1–3 с участками 7–9 для давлений компактирования 100 и 500 МПа. Визуально наблюдается идентичность структуры по размеру и морфологии порового пространства верхних и нижних слоев брикета как для 100, так и для 500 МПа. Средние размеры пор при давлении прессования 100 МПа (рис. 10, а) составляют порядка 40 мкм. При давлении 500 МПа средний размер пор существенно

уменьшается (рис. 10, б) и составляет примерно 10 мкм. Вероятно, при дальнейшем повышении давления прессования можно достичь полного «закрытия» крупных пор. Однако, как показывают известные экспериментальные и теоретические исследования, при такой схеме напряженного состояния для получения квазибеспористой порошковой заготовки величина осевого давления должна быть бесконечно велика. Таким образом, с точки зрения «энергоэффективности» процесса уплотнения на стадии заготовительного производства актуальна задача исследования влияния схемы напряженного состояния на эволюцию пористости сжимаемой среды.

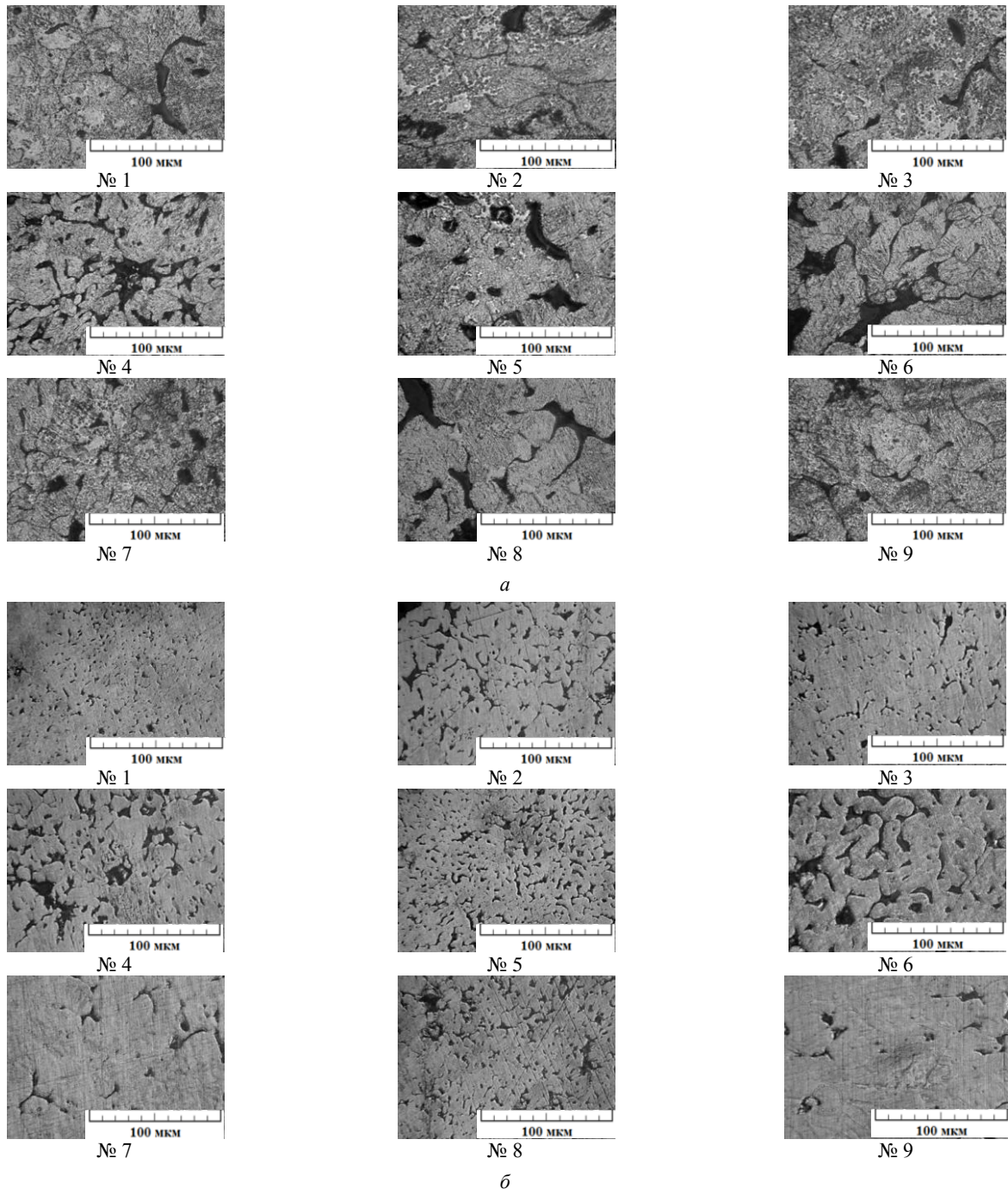


Рис. 10. Микроструктура в продольном сечении брикета, спрессованного при давлении 100 МПа (а) и 500 МПа (б)
 Fig. 10. The microstructure in the longitudinal section of the bar compressed at a pressure of 100 MPa (a) and 500 MPa (b)

Для оценки микротвердости проводилось кинетическое микроиндентирование при нагрузке 50 г, результаты приведены в таблице. Очевидно, что с увеличением степени пластической деформации значения твердости (HV 0,05) возрастают, а условного показателя пластичности ϕ и ползучести C_{II} уменьшаются.

Результаты микроиндентирования

Results of microindentation

Давление прессования, МПа	Слой брикета	HV 0,05	h_{max}	$E_{упр}$, ГПа	ϕ , %	C_{II} , %
100	верхний	149	1,12	93	92	0,65
	нижний	152	1,1	88	88	0,5
500	верхний	226	0,92	91	83	0,41
	нижний	230	0,91	87	80	0,43

Заключение

На основе моделирования процесса двухстороннего прессования порошкообразного отсева губчатого титана в пресс-форме с плавающей матрицей получена картина распределения плотности в сечении порошковой заготовки на разных стадиях уплотнения. Адекватность компьютерной модели и результатов расчета плотности, а также ее распределения по объему заготовки под-

Библиографический список

1. Андриевский Р.А. Введение в порошковую металлургию. – Фрунзе: ИЛИМ, 1988. – 172 с.
2. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М.: Физмалит, 2009. – 272 с.
3. Либенсон Г.А., Панов В.С. Оборудование цехов порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1983. – 263 с.
4. Пат. 2686436 Российская Федерация, МПК B22F3/03 (2006.01), B30B15/02 (2006.01). Пресс-форма для двухстороннего прессования порошка / Березин И.М., Залазинский А.Г.; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. – No 2018132622; заявл.12.09.2018; опубл.25.04.2019, Бюл. № 12. – 1 с.
5. Лебедев В.А., Рогожников Д.А. Металлургия титана: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2015. – 194 с.
6. Hartman A.D., Gerdemann S.J., Hansen J.S. Producing lower-cost titanium for automotive applications // JOM. – 1998. – Vol. 50. – No. 9. – P. 16–19.
7. Dodds H.V., Davies G.F. Hot pressing, press forming loom as answers to titanium fabrication // Journals of Metals. – 1954. – Vol. 6. – No.10. – P. 1116–1118.
8. Weber E.P. A short cut to titanium part // Modern metals. – 1957. – Vol. 13. – No. 1. – P. 48–53.
9. Жевноватый А.И., Шенберг Г.Ф. Исследование по технологии изготовления пористых титановых труб // Порошковая металлургия. – 1965. – No. 2 (26). – С. 9–14.
10. Шибряев Б.Ф., Павловская Е.И., Горячева З.В. Применение титана в промышленности // Институт титана. – М.: Цветметинформация, 1970. – Т. 2. – С. 84–91.
11. Experimental investigation of the shock compression of titanium powder and sponge / A.A. Deribas, A.V. Krupin, E.V. Kuz-

тверждена результатами исследования продольных сечений брикетов методами количественной металлографии. Построены графики зависимости средней относительной плотности полученных порошковых заготовок от давления прессования. Результаты количественной металлографии и измерений микротвердости показывают, что предлагаемая конструкция пресс-формы с плавающей матрицей позволяет получать заготовки, обладающие более равномерным распределением плотности в сравнении с изготовленными путем одностороннего прессования. Использование таких брикетов в качестве заготовок для дальнейшей пластической деформации в силу наследственного характера пористости позволит изготавливать изделия, обладающие более однородными по объему физико-механическими свойствами.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00107.

Acknowledgment

The researches have been supported by the Russian Foundation for Basic Research No. 18-38-00107

- netsov, A.M. Staver, V.Ya. Solov'ev // Fizika Goreniya i Vzryva. – 1973. – Vol. 9. – No.6. – P. 883–887.
12. О свойствах компактного титана, полученного обработкой давлением губчатого титана / М.П. Бондарь [и др.] // Цветные металлы. – 1978. – № 12. – С. 75–78.
13. Лаптев А.М., Ободовский Е.С. Пластическая деформация губчатого титана // Порошковая металлургия. – 1986. – № 7. – С. 20–26.
14. Ободовский Е.С., Лаптев А.М. Влияние технологических факторов на свойства плотных брикетов и изделий из титановой губки // Порошковая металлургия. – 1987. – № 4. – С. 28–33.
15. Пат. 2048268 Рос. Федерация, МПК В 22 F 3/16 (1995.01). Способ изготовления деформированных полуфабрикатов из титановой стружки / Гиршов В.Л., Петров Н.П.; заявитель и патентообладатель малое предприятие «Порошковый инструмент». – No. 5046757/02; заявл. 09.06.1992; опубл. 20.11.1995.
16. Пат. 2197548 Рос. Федерация, МПК С 22 В 9/20 (2000.01), С 22 В 9/18 (2000.01), Н 05 В 7/07 (2000.01). Способ получения расходоуемых электродов из металлической стружки / Гиршов В.Л. [и др.]; заявитель и патентообладатель государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт материалов». – № 2001109063/02; заявл. 28.03.2001; опубл. 27.01.2003. Бюл. № 3.
17. Пат. 2201977 Рос. Федерация, МПК С 22 В 1/248 (2000.1), С 22 В 7/00 (2000.01), В 22 F 8/00 (2000.1). Способ изготовления деформированных заготовок из металлической стружки и устройство для его осуществления / Гиршов В.Л. [и др.]; заявитель и патентообладатель государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт материалов». – № 2001113682/02; заявл. 15.05.2001; опубл. 10.04.2003. Бюл. № 10.

18. Пат. 2228960 Российская Федерация, МПК С 22 В 1/248 (2000.1), С 22 В 7/00 (2000.01), В 22 F 8/00 (2000.1). Способ получения деформированных полуфабрикатов из металлической стружки / Гиршов В.Л., Трещевский А.Н., Петров В.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное общество «Металлоресурс». – № 2002131407/02; заявл. 15.11.2002; опубл. 20.05.2004. Бюл. № 14.
19. Method for forming consumable electrodes from metallic chip scraps: US/2005/6953078 / Girshov V.L., Podpalkin A.M., Treschevskiy A.N., Abramov A.A. – Publication Date: 11.10.2005.
20. Method and apparatus for forming billets from metallic chip scraps: US/2006/7037466 / Girshov V.L., Treschevskiy A.N., Kochkin V.G., Abramov A.A., Sidenko N.S. – Publication Date: 02.05.2006.
21. Залазинский А.Г., Новожинов В.И., Колмыков В.Л. Влияние технологических факторов на свойства плотных брикетов и изделий из титановой губки // *Металлы*. – 1997. – № 6. – С. 28.
22. Залазинский А.Г., Новожинов В.И., Давыдова Л.С. Исследование возможности получения прутков из титановой губки // *Цветные металлы*. – 1999. – № 3. – С. 91–92.
23. Моделирование процесса выдавливания прутков из титановой губки / М.В. Соколов [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2000. – № 4. – С. 65.
24. Method for production of titanium welding wire: WO/2011/049465 / Dring K. – Publication Date: 28.04.2011.
25. Method for production of alloyed titanium welding wire: WO/2012/127426 / Dring K., Gulbrandsen-Dahl S., Jensrud O., Kolbu A. – Publication Date: 27.09.2012.
26. Synthesis and consolidation of TiAl by MA–PDS process from sponge–Ti and chip–Al / Z.M. Sun, Q. Wang, H. Hashimoto, S. Tada, T. Abe // *Intermetallics*. – 2003. – Vol. 11. – P. 63–69.
27. Zadra M. Facile mechanical alloying of titanium sponge // *Materials Science & Engineering*. – 2014. – Vol. A590. – P. 281–288.
28. Consumable electrode for production of Nb–Ti alloys: US/1986/4612040 / Masaaki Koizumi, Fukada Nobuo, Okano Hiroyuki – Publication Date: 09.16.1986.
29. Kyo Takahashi, Eiichi Sato. Mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy using off grade sponge titanium as raw material // *Tetsu-to-Hagane*. – 2012. – Vol. 98. – No. 9. – P. 491–496.
30. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder / A. Hadadzadeh, M.A. Whitney, M.A. Wells, S.F. Corbin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 243. – P. 92–99.
31. Влияние температуры на компактируемость брикетов из титановой губки, легированной водородом / А.В. Нестеренко [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – № 1(2). – С. 52–57.
32. Нестеренко А.В., Новожинов В.И., Залазинский А.Г. Влияние деформационной обработки на свойства и структуру титана, полученного пластической деформацией титановой губки легированной водородом // *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*. – 2015. – № 3. – С. 98–108.
33. Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V. Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2004. – Vol. 46. – No. 11–12. – P. 527–534.
34. Berezin I.M., Polyakov A.P. Mathematical modelling of drawing rods made of titanium sponge allowing for pore formation // *Russian Journal of Non-Ferrous metals*. – 2016. – Vol. 57. – No. 6. – P. 555–564.
35. Berezin I.M., Nesterenko A.V., Zalazinskii A.G. Identification of the modified Drucker–Prager yield condition and modelling of compaction of the plasticized titanium feedstock // *Russian Journal of Non-Ferrous metals*. – 2017. – Vol. 58. – No. 3. – P. 297–302.
36. Influence of Stress State Conditions on Densification Behavior of Titanium Sponge / I.M. Berezin, A.V. Nesterenko, A.G. Zalazinskii, G. Kovacs // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2017. – Vol. 14. – No. 6. – P. 153–168.
37. Потапов А.И., Логинов Ю.Н., Вичужанин Д.И. Влияние плотности на сопротивление деформации губчатого титана // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 4. – С. 24–27.
38. Логинов Ю.Н., Потапов А.И., Шалаев Н.А. Влияние температуры и скорости деформации на упрочнение титановой губки // *Титан*. – 2012. – № 3 (37). – С. 36–42.
39. Ivasishin O.M. Cost-effective manufacturing of titanium parts with powder metallurgy approach // *Materials Forum*. – 2005. – Vol. 29. – P. 1–8.
40. Titanium powder metallurgy for automotive components / O.M. Ivasishin, D.G. Savvakina, V.S. Moxson, K.A. Bondareva, F.H. Froes // *Materials Technology*. – 2002. – Vol. 17. – No. 1. – P. 20–25.
41. Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseointegration / A.P. Rubshtein, I.Sh. Trakhtenberg, E.B. Makarova, E.B. Triphonova, D.G. Bliznets, L.I. Yakovenkova, A.B. Vladimirov // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 35. – P. 363–369.
42. Интеграция костной ткани в пористые титановые импланты с алмазоподобными нанопокровками / Э.Б. Макарова [и др.] // *Гений ортопедии*. – 2011. – № 4. – С. 111–116.
43. Березин И.М., Белозеров Г.А. Определение параметров модели пластического течения порошкового материала экспериментально-аналитическим методом // *XXI Зимняя школа по механике сплошных сред: сб. тез. докл.* – Пермь, 2019. – С. 43.
44. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Наука, 2004. – 643 с.
45. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 262 с.
46. Горбулинский А.А. Экспериментально-аналитическое определение характеристик эластомеров для моделирования процессов деформирования тонкого листа эластичным рабочим инструментом [Электронный ресурс] // *Студенческая весна 2013. Машиностроительные технологии: тр. всерос. науч.-техн. конф.* – Москва, 2013. С. 1–13. (studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=796) (дата обращения: 20.03.2019).

References

1. Andrievskii R.A. Vvedenie v poroshkovuiu metallurgiiu [Introduction to powder metallurgy]. *Frunze, ILIM*, 1988, 172 p.
2. Shestakov N.A., Subich V.N., Demin V.A. Uplotnenie, konsolidatsiia i razrushenie poristykh materialov [Compaction, consolidation and destruction of porous materials]. *Moscow, Fizmalit*, 2009, 272 p.
3. Libenson G.A., Panov V.S. Oborudovanie tsekhov poroshkovoii metallurgii [Equipment for powder metallurgy plants]. *Moscow, Metallurgiiia*, 1983, 263 p.
4. Pat. RU/2019/2686436. Press-forma dlya dvukhstoronnego pressovaniya poroshka [Pressing tool for bi-directional compression of metal powder]
5. Lebedev V. A., Rogozhnikov D.A. Metallurgiiia titana: uchebnoe posobie [Titanium metallurgy: textbook]. *Ekaterinburg, UMTs UPI*, 2015, 194 p.
6. Hartman A. D., Gerdemann S. J., Hansen J. S. Producing lower-cost titanium for automotive applications. *JOM*, 1998, vol. 50, no. 9, pp. 16-19.
7. Dodds H.V., Davies G.F. Hot pressing, press forming loom as answers to titanium fabrication. *Journals of Metals*, 1954, vol. 6, no.10, pp. 1116–1118.
8. Weber E.P. A short cut to titanium part. *Modern metals*, 1957, vol. 13, no.1, pp. 48-53.
9. Zhevnovatsky A.I., Shenberg G.F. Issledovanie po tekhnologii izgotovleniia poristykh titanovykh trub [Investigation on the technology of manufacturing porous titanium tubes]. *Poroshkovaia metallurgiiia*, 1965, no.2 (26), pp.9-14.
10. Shibriaev B.F., Pavlovskaiia E.I., Goriacheva Z.V. Primenenie titana v promyshlennosti [Use of titanium in the titanium industry]. *Moscow, Tsvetmetinformatsiia*, 1970, vol. 2, pp. 84-91.
11. Deribas A.A., Krupin A.V., Kuznetsov E.V., Staver A.M., Solov'ev V.Ya. Experimental investigation of the shock compression of titanium powder and sponge. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1973, vol. 9, no.6, pp. 883-887.
12. Bondar' M.P., Voitsekhovskii B.V., Obodovskii E.S., Kharchenko V.A. O svoistvakh kompaktnogo titana, poluchennogo obrabotkoi davleniem gubchatogo titana [Properties of compact titanium obtained by pressure treatment of titanium sponge]. *Tsvetnye metally*, 1978, no.12, pp. 75-78.
13. Laptev A.M., Obodovskii E.S. Plastic deformation of sponge titanium. *Powder metallurgy and metal ceramics*, 1986, vol.25. no.7, pp. 547-552.
14. Obodovskii E.S., Laptev A.M. Effect of technological factors on the properties of high-density titanium sponge compacts. *Powder metallurgy and metal ceramics*, 1987, vol. 26. no. 4. pp. 295-299.
15. Pat. RU/1995/2048268. Sposob izgotovleniia deformirovannykh polufabrikatov iz titanovoi struzhki [Method for manufacturing deformed semifinished workpieces of titanium shavings].
16. Pat. RU/2003/2197548. Sposob polucheniia raskhodue-mykh elektrodov iz metallicheskoi struzhki [Method for obtaining consumable electrodes of metal shavings].
17. Pat. RU/2003/2201977. Sposob izgotovleniia deformirovannykh zagotovok iz metallicheskoi struzhki i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Method for manufacturing deformed workpieces metal shavings and device for its implementation].
18. Pat. RU/2004/2228960. Sposob polucheniia deformirovannykh polufabrikatov iz metallicheskoi struzhki [Method for obtaining deformed semifinished workpieces of metal shavings].
19. Pat. US/2005/6953078. Method for forming consumable electrodes from metallic chip scraps.
20. Pat. US/2006/7037466. Method and apparatus for forming billets from metallic chip scraps.
21. Zalazinskii A.G., Novozhonov V.I., Kolmykov V.L. Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na svoistva plotnykh briketov i izdelii iz titanovoi gubki [Influence of processing factors on the properties of dense compacts and titanium sponge products]. *Metally*, 1997, no.6, pp.28.
22. Zalazinskii A.G., Novozhonov V.I., Davydova L.S. Issledovanie vozmozhnosti polucheniia prutkov iz titanovoi gubki [Study of the possibility of obtaining titanium sponge bars]. *Tsvetnye metally – Non-ferrous metals*, 1999, no.3, pp.91-92.
23. Sokolov M.V., Stepanenko V.I., Zalazinskii A.G., Lisin A.L. Modelirovanie protsessa vydavlivaniia prutkov iz titanovoi gubki [Simulation of the process of extruding titanium sponge rods]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgiiia – Russian journal of non-ferrous metals*, 2000, no.4, pp.65.
24. Pat. WO/2011/049465. Method for production of titanium welding wire.
25. Pat. WO/2012/127426. Method for production of alloyed titanium welding wire.
26. Sun Z. M., Wang Q., Hashimoto H., Tada S., Abe T. Synthesis and consolidation of TiAl by MA–PDS process from sponge–Ti and chip–Al. *Intermetallics*, 2003, vol. 11, pp. 63-69.
27. Zadra M. Facile mechanical alloying of titanium sponge. *Materials Science & Engineering*, 2014, vol. A590, pp. 281-288.
28. Pat. US/1986/4612040. Consumable electrode for production of Nb-Ti alloys.
29. Kyo Takahashi, Eiichi Sato. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy using off grade sponge titanium as raw material. *Tetsu-to-Hagane*, 2012, vol. 98, no. 9, pp. 491-496.
30. Hadadzadeh A., Whitney M.A., Wells M.A., Corbin S.F. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 243, pp. 92-99.
31. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinskii A.G., Skripov A.V. Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 287–292.
32. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Vichuzhanin D.I. Vliianie deformatsionnoi obrabotki na svoistva i strukturu titana, poluchennogo plasticheskoi deformatsiei titanovoi gubki legirovannoi vodorodom [Effect of deformation processing on the properties and structure of titanium obtained by plastic deformation of hydrogen-alloyed titanium sponge]. *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*, 2015, no. 3, pp. 98-108.
33. Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V. Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior. *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 46, no. 11-12, pp.527-534.
34. Berезин И.М., Polyakov A.P. Mathematical modelling of drawing rods made of titanium sponge allowing for pore formation. *Russian Journal of Non-Ferrous metals*, 2016, vol. 57, no. 6, pp. 555-564.
35. Berезин И.М., Nesterenko A.V., Zalazinskii A.G. Identification of the modified Drucker–Prager yield condition and modelling of compaction of the plasticized titanium feedstock. *Russian Journal of Non-Ferrous metals*, 2017, vol. 58, no.3, pp. 297-302.
36. Berезин И.М., Nesterenko A.V., Zalazinskii A.G., Kovacs G. Influence of Stress State Conditions on Densification Behavior of

Titanium Sponge. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2017, vol. 14, no.6, pp. 153-168.

37. Potapov A.I., Loginov Yu.N., Vichuzhanin D.I. Vliianie plotnosti na soprotivlenie deformatsii gubchatogo titana [Influence of compactness on flow stress of spongy titanium]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2010, no. 4, pp. 24-27.

38. Loginov Yu.N., Potapov A.I., Shalaev N.A. Vliianie temperatury i skorosti deformatsii na uprochnenie titanovoi gubki [Influence of temperature and strain rate on hardening of the titanium sponge]. *Titan*, 2012, no. 3 (37), pp. 36-42.

39. Ivasishin O.M. Cost-effective manufacturing of titanium parts with powder metallurgy approach. *Materials Forum*, 2005, vol. 29, pp. 1-8.

40. Ivasishin O.M., Savvakina D.G., Moxson V.S., Bondareval K.A., Froes F.H. Titanium powder metallurgy for automotive components. *Materials Technology*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 20-25.

41. Rubshtein A.P., Trakhtenberg I.Sh., Makarova E.B., Triphonova E.B., Bliznets D.G., Yakovenkova L.I., Vladimirov A.B. Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseointegration. *Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 35, pp.363-369.

42. Makarova E.B., Zakharov Yu. M., Rubshtein A.P., Isaikin A.I. Integratsiia kostnoi tkani v poristye titanovye implanty s almazopodobnymi nanopokrytiiami [Integration of bone tissue to

porous titanium implants with diamond-like nanocoatings]. *Genii ortopedii*, 2011, no. 4, pp. 111-116.

43. Berezin I.M., Belozherov G.A. Opredelenie parametrov modeli plasticheskogo techeniia poroshkovogo materiala eksperimental'no-analiticheskimi metodami [Determining the parameters of the plasticity model of a powder material by an experimental-analytical method]. *Perm, XXI Zimniaia shkola po mekhanike sploshnykh sred: sbornik tezisev dokladov*, 2019, pp. 43.

44. Rybin Iu.I., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem [Mathematical simulation and design of technological processes of metal forming]. *Saint Petersburg, Nauka*, 2004, 643 p.

45. Korobeinikov S.N. Nelineinoe deformirovanie tverdykh tel [Nonlinear deformation of solids]. *Novosibirsk, Publishing SO RAN*, 2000, 262 p.

46. Gorbunskii A.A. Eksperimental'no-analiticheskoe opredelenie kharakteristik elastomerov dlia modelirovaniia protsessov deformirovaniia tonkogo lista elastichnym rabochim instrumentom [Experimental and analytical determination of the characteristics of elastomers for simulating the processes of a thin sheet deformation using working tool]. *Moscow, Stencheskaia vesna 2013. Mashinostroitel'nye tekhnologii: trudy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 2013, pp. 1-13.