

Теория экструзии вязко-пластичных сред: история, терминология, классификация

В.В. Пятов, А.Н. Голубев

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

E-mail: tm@vstu.by

Аннотация. В работе дан ретроспективный анализ научных публикаций, посвященных развитию теоретических представлений о процессах получения изделий экструзионным методом. Основное внимание уделено способам теоретического описания экструзии высоконаполненных пластичных композиций, состоящих из трех фаз: твердых частиц основной фазы, мягкого пластификатора и газовой фазы. К таким композициям, в частности, относятся пластифицированные металлические, твердосплавные и керамические порошки, которые по своим физическим и технологическим свойствам существенно отличаются от вязких жидкостей, литых металлов и чистых порошков. Анализ публикаций показывает, что общая теория деформации подобных сред пока не построена.

Ключевые слова: экструзия, вязко-пластичная среда, пластифицированный порошок, теория деформации, порошковая металлургия.

Visco-Plastic Media Extrusion Theory: History, Terminology, Classification

V. Pyatov, A. Golubev

Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus

E-mail: tm@vstu.by

Annotation. The work provides a retrospective analysis of scientific publications describing the development of theoretical ideas about the processes of producing products using the extrusion method. The main attention is paid to methods for theoretically describing the extrusion of highly filled plastic compositions consisting of three phases: solid particles of the main phase, soft plasticizer and gas phase. Such compositions include plasticized metal, carbide and ceramic powders, which in their physical and technological properties differ significantly from viscous liquids, cast metals and pure powders. An analysis of publications shows that a general theory of deformation of such media has not yet been constructed.

Key words: extrusion, visco-plastic medium, plasticized powder, theory of deformation, powder metallurgy.

ВВЕДЕНИЕ

Экструзия является одним из традиционных методов формования вязко-пластичных сред. Метод экструзии состоит в том, что нагретая формуемая масса продавливается через фильеру с помощью пуансона или шнека, после чего материал охлаждается и застывает, при этом изделие приобретает требуемую форму сечения. Данная технология хорошо освоена в химической промышленности [1–2], где находит применение для гомогенизации и пластикации исходного сырья. В электротехнической промышленности экструзия широко применяется для нанесения полимерной термопластичной изоляции на провода [3].

В отличие от экструзии термопластичных полимерных материалов, которые в теоретических моде-

лях рассматривают как вязкие жидкости, экструзия твердых измельченных материалов изучена хуже. С помощью выдавливания пластифицированных керамических и металлических порошков через фильеру заданного сечения получают длинномерные изделия разного профиля, такие, как теплообменники, фильтры, порошковые шнуры для нанесения покрытий [4]. Существуют технологии шнековой переработки измельченных отходов гальванических производств [5], освоена технология термомеханического экструзионного рециклинга отходов обувных производств [6–10].

Поскольку по мере развития промышленного производства шнековые машины (червячные прессы) начинали находить применение для получения самых различных изделий, исторически сложилось так, что

и теория экструзии независимо стала развиваться параллельно в разных отраслях промышленности. Это привело к терминологической запутанности, когда одинаковые по своей сути процессы могут называться по-разному, в зависимости от того, какие материалы формуют и какое оборудование для этого используют. И наоборот, разные по своим физическим проявлениям процессы часто могут называться одинаково. К примеру, под «горячей экструзией» в порошковой металлургии и химической промышленности подразумевают принципиально разные процессы деформации среды. В первом случае речь может идти о деформации материала, не сопровождающейся его упрочнением при температурах выше температуры рекристаллизации, во втором – о вязком течении нагретого термопластичного полимерного материала. Такая путаница в терминах приводит к дополнительным трудностям.

Большой вклад в разработку технологии и оборудования для шнековой экструзии был сделан в пищевой индустрии, где она широко используется для транспортировки, измельчения, отжима разнообразных продуктов питания (набивка колбас, формование сухих кормов, кондитерская промышленность). Многие исследования по экструзии выполнены учеными, работающими в химической промышленности, где экструдеры (ранее часто называемые червячными прессами) используют для формования термопластичных полимеров [11–12]. Аналогичное оборудование применяют энергетики и связисты при изготовлении кабельной продукции, в этом случае с помощью экструзионных головок специальной конструкции осуществляют нанесение термопластичной полимерной изоляции на токопроводящие металлические жилы. Экструзию используют в строительной промышленности для формования керамических дренажных [13] и канализационных [14] труб, глиняного кирпича [15] и других стройматериалов. Изделия из тонкой технической керамики тоже можно формовать экструзией [16]. В порошковой металлургии экструзией формуют твердые сплавы [17], тугоплавкие и жаропрочные соединения [18]. Разновидностью экструзии – мундштучным выдавливанием – получают изделия из жестких ферритовых и мягких металлических [19] порошков. Как видно из приведенного краткого обзора, области промышленного применения процесса экструзии весьма разнообразны.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Научные публикации, посвященные научным и технологическим проблемам экструзии, начали появляться в первой половине XX века и были обобщены в фундаментальном труде советского ученого М.Ю. Бальшина [20]. Использование спеченных твердых сплавов для изготовления режущего инструмента произвело в то время революцию в металлообработке [21]. Применение пластификаторов

позволило разработать технологию экструзии жестких труднопрессуемых керамических порошков [22]. Заметной вехой стала монография Г.П. Злобина [23], обобщающая достижения теории и технологии получения изделий из твердых сплавов.

Успехи твердосплавной промышленности стимулировали применение холодной экструзии для формования изделий из других сыпучих сред. Так, был разработан процесс прессования жестких ферритовых порошков [24], заключающийся в экструзии порошка, пластифицированного поливиниловым спиртом или парафином [25]. Все эти порошки в чистом виде плохо прессуются и использование при их формовании связующе-пластифицирующих добавок представляется естественным.

Однако и при экструзии сравнительно мягких металлических порошков тоже часто прибегают к пластификации [26]. Освоены технологии формования титановых сварочных электродов [27], алюминиевых [28–29] и бронзовых [30] изделий, фильтров из нержавеющей стали [31] и псевдосплавов [32]. Можно утверждать [33], что при правильной пластификации возможно прессовать любые порошковые среды.

Формуемые экструзией высоконаполненные пластичные композиции состоят из трех радикально различающихся по составу и свойствам фаз: твердых частиц основной фазы, мягкого пластификатора и газовой фазы. В научных публикациях встречаются следующие способы описания процесса деформации таких многофазных сред.

1. Пластичная измельченная среда ассоциируется с вязкой жидкостью. Так как это неньютоновская жидкость [34], то рассматривают различные реологические модели: от простого тела Бингама – Шведова до весьма сложных комбинаций [35–36]. Наиболее простую классификацию вязких жидкостных систем предложил Додж [37]. По этой классификации жидкости бывают вязкими, с нестационарными реологическими характеристиками и упруго-вязкими. К первой группе относятся ньютоновские жидкости с линейной кривой течения, бингамовские вязко-пластичные среды и аномально-вязкие реологические системы с нелинейной кривой течения. Пластифицированные порошки по своим реологическим свойствам ближе всего к аномально-вязким средам.

Различают псевдопластичные и дилатантные аномально-вязкие системы. Псевдопластичностью обладают суспензии с асимметричными частицами; дилатансия характерна для паст и суспензий с большим содержанием твердой фазы. Для аномально-вязких псевдопластичных систем предложено большое количество реологических моделей, но наибольшее распространение получила степенная модель Оствальда – Рейнера [38]. Принципиальным недостатком этой модели является зависимость коэффициентов, определяющих течение среды, от ее температуры [39]. Принцип температурной инвари-

антности основных реологических характеристик среды сначала был предложен А. Александровым и Ю. Лазуркиным [40], а затем исследован Г. Виноградовым, А. Малкиным [41] и В. Каргиным [42].

Пластифицированные порошковые среды также подвергались реологическим исследованиям. Установлено, что такие материалы являются пластично-вязкими телами. Измерены их вязкость и предел текучести, изучено поведение в условиях сдвига и определены основные закономерности экструзии. Хорошее совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований получено лишь для материалов, содержащих жидкие растворы неорганических пластификаторов, например, бентонитовой глины с водой. Изучение таких смесей представляет чисто теоретический интерес, так как мягкие прессовки деформируются под собственным весом и для практических целей непригодны. Сделан вывод о неприменимости гидродинамической аналогии при описании деформации пластифицированных металлических и керамических порошков [43].

В работе [44] была предпринята интересная попытка построить математическую модель, адекватно описывающую деформацию необратимо уплотняемых сред. Металлические порошки в этой модели считают вязко-пластичными телами, лишенными упругих свойств. Состояние таких сред определяется температурой, пористостью и параметрами упрочнения. Однако влияние пластификатора на реологию смеси в этом исследовании осталось неизученным.

Корректно построенная модель процесса экструзии пластичной среды должна оперировать коэффициентами, инвариантными к напряжениям и скоростям деформации материала; лишь в этом случае возможно проведение аналитических преобразований. Для жидкостей таким коэффициентом, в известных пределах, является вязкость. В гидродинамической же модели аналог вязкости зависит от многих параметров процесса течения, в том числе и от давления. Математический аппарат гидродинамики хорошо развит для несжимаемых жидкостей, а вязко-пластичные среды, формуемые экструзией, способны к необратимому уплотнению, продолжающемуся до тех пор, пока пластификатор не займет все свободное пространство, и газовая фаза полностью не исчезнет. Поэтому гидродинамическая аналогия для описания процесса деформации таких материалов, вообще говоря, неприменима.

2. Известны попытки применения уравнений механики деформируемого твердого тела для описания течения сжимаемых сред. Основанием для этого является наличие у таких материалов небольшой прочности, возрастающей при уплотнении, что объясняется связующими свойствами пластификатора. Модель среды в этом случае строится с использованием таких ее характеристик, как предел текучести,

предел упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент трения. Эти параметры, оставаясь постоянными в известных пределах для литых металлов, являются сложными функциями напряженного состояния для необратимо сжимаемых сред, из-за чего проведение аналитических преобразований, вообще говоря, оказывается невозможным [45].

Следует выделить случай, когда материал, подвергаемый экструзии, уплотнен до компактного состояния (сжат так, что газовая фаза полностью исчезла и пластификатор занял все свободное пространство). Свойства среды в таком состоянии стабилизируются, предел текучести перестает зависеть от напряжений, связь между нормальными и касательными напряжениями на поверхности трения близка к линейной. Отмечается, что для уплотненной до такой степени композиции применимы уравнения деформации неупрочняемого литого металла, но со специфическими граничными условиями [46].

В теории обработки металлов давлением касательные напряжения на поверхности деформации часто считают не зависящими от нормальных напряжений или зависящими линейно. И в том, и в другом случае используемые для описания деформации характеристики среды считаются инвариантными к напряжениям в широком интервале давлений, что уводит от реальности, но позволяет решать уравнения течения. Иногда даже удается получить хорошее совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований, вовсе пренебрегая внешним трением. Это объясняется тем, что при прессовании литых металлов большая часть энергии деформации затрачивается на изменение формы, на внутреннее трение. Поэтому закон внешнего трения для таких прочных сред не особенно и важен.

Пластифицированный порошок, даже спрессованный до несжимаемого состояния, имеет пределы текучести и прочности на два–три порядка меньше, чем литой металл. Это приводит к перераспределению энергозатрат между внутренним и внешним трением при деформации среды в пользу последнего. Поэтому неточность в задании граничных условий при формовании сыпучих сред приводит к потере адекватности модели, построенной по аналогии с литым металлом. Можно сделать вывод: для измельченных сред, подвергаемых экструзии, очень важно правильно задать закон внешнего трения.

3. Общая теория уплотнения порошковых сред пока не создана. В ее основе должна лежать зависимость плотности среды от напряженного состояния [47], опирающаяся на инвариантные к напряжениям параметры. Разнообразие порошков делает построение общей теории чрезвычайно сложной задачей [48].

Предприняты попытки решения более простой задачи по отысканию связи между плотностью среды и давлением в ней при равномерном всестороннем сжатию [49]. Получены многочисленные уравнения

прессования [50–51], имеющие ограниченные области применения. Универсальной зависимости даже для простого случая равномерного всестороннего сжатия не обнаружено.

М. Ю. Бальшин, Г. М. Жданович и О. В. Роман приняли в качестве модели дискретную среду, представляя ее в виде шероховатых шаров, материал которых подчинен только закону Гука [52].

Основные задачи пластичности и контактной прочности из-за математических трудностей были только сформулированы и в общем случае не решены. Даже для таких упрощенных моделей при выводе уравнений прессования часто не учитываются столь важные факторы, как скорость деформации среды и трение на ее поверхности. В условиях математических трудностей при выводе аналитических решений получили развитие численные методы математического моделирования дискретных сред, основанные на методе дискретных элементов DEM (Discrete Element Method), который реализован в ряде программных средств инженерного анализа. Такой подход основан на моделировании свойств каждой отдельной частицы и представлении фор-

муемого материала в виде идеализированного набора частиц, размещенных в материальном цилиндре экструдера [53].

В порошковой металлургии обычно используют такие характеристики среды, как коэффициенты внешнего и межчастичного трения, коэффициент бокового давления. У пластифицированных порошков они не только сильно зависят от напряжений, но и зависят нелинейно [54]. Для построения теории деформации таких сред необходимо найти инвариантные к напряжениям характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, пластифицированный порошок по своим физическим и технологическим свойствам существенно отличается от вязких жидкостей, литых металлов и чистых классических порошков. Теория деформации таких сред пока не построена. Внешнее трение пластифицированного порошка не может быть описано с помощью линейного закона Кулона – Амонтона из-за сильной зависимости коэффициентов трения и бокового давления от вида напряженного состояния и величины действующих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин, В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. – Санкт-Петербург : Профессия, 2005. – 480 с.
2. Ким, В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. – Москва : Химия, 2005. – 568 с.
3. Производство кабелей и проводов / Н. И. Белоруссов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 632 с.
4. Пятов, В. В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов / В. В. Пятов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2002. – 237 с.
5. Шелег, В. К. Переработка гальваноотходов / В. К. Шелег, А. С. Ковчур, В. В. Пятов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2004. – 185 с.
6. Матвеев, К. С. Термомеханический рециклинг композиции из отходов подошвенных пенополиуретанов шнековой экструзией / К. С. Матвеев, В. В. Пятов // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : материалы VIII междунар. науч.-тех. конф., Гродно, 29–30 октября 2009 г. : в 2 ч. / УО «ГрГУ им. Я. Купалы». – Гродно, 2009. – Ч. 2. – С. 304–310.
7. Экструдер для термомеханического рециклинга отходов интегральных полиуретанов : пат. ВУ 5320 : МПК (2006) С 08G 18/00 / К. С. Матвеев, А. К. Новиков, В. В. Пятов, С. В. Бровко, А. К. Матвеев, А. Н. Голубев. – Оpubл. 30.06.2009.
8. Шнековый экструдер для переработки полимерсодержащих отходов : пат. ВУ 5953 : МПК (2009) В 29С 47/00, С 08G 18/00 / А. К. Новиков, К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. Н. Голубев, С. В. Бровко, Т. С. Куксенюк. – Оpubл. 28.02.2010.
9. Экспериментальный экструдер для переработки полимерных отходов : пат. ВУ 6093 : МПК (2009) В 29С 47/92 / А. К. Новиков, К. С. Матвеев, С. В. Бровко, В. В. Пятов, А. Н. Голубев, А. К. Матвеев. – Оpubл. 30.04.2010.
10. Способ переработки отходов жестких полиуретанов : пат. ВУ 16053 : МПК С 08J 11/10 (2006.01) / К. С. Матвеев, В. В. Пятов, А. К. Новиков, Е. А. Егорова, Г. Н. Солтовец, А. К. Матвеев. – Оpubл. 30.06.2012.
11. Иванченко, А. И. Расчет одночервячных прессов / А. И. Иванченко. – Киев, 1962. – 120 с.
12. Каплун, Я. Б. Формующее оборудование экструдеров / Я. Б. Каплун, В. С. Ким. – Москва : Машиностроение, 1969. – 160 с.
13. Лукинов, М. И. Производство керамических дренажных труб / М. И. Лукинов. – Москва : Стройиздат, 1981. – 216 с.
14. Производство керамических канализационных труб / Р. М. Зайонц [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1971. – 172 с.

15. Кашкаев, И. С. Производство глиняного кирпича / И. С. Кашкаев, Е. Ш. Шейман. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1978. – 248 с.
16. Ничипоренко, С. П. О формировании керамических масс в ленточных прессах / С. П. Ничипоренко. – Киев : Наукова думка, 1971. – 75 с.
17. Плющ, Г. В. Исследование закономерностей мундштучного прессования металлокерамических твердых сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Плющ. – Киев, 1970. – 27 с.
18. Тугоплавкие соединения / Г. В. Самсонов [и др.]. – Москва : Metallurgia, 1976. – 558 с.
19. Клименков, С. С. Теория и технология экструдирования реологических порошковых композиций методом шнекового прессования, создание оборудования и внедрение в народное хозяйство : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06 / С. С. Клименков. – Минск, 1991. – 436 с.
20. Бальшин, М. Ю. Порошковая металлургия / М. Ю. Бальшин. – Москва, 1938. – 288 с.
21. Каспаров, А. М. Советские твердые и сверхтвердые сплавы и способы их применения / А. М. Каспаров. – Москва, 1932. – 120 с.
22. Брохин, И. С. Формование порошков твердосплавных смесей методом выдавливания / И. С. Брохин // Твердые сплавы. – Москва : ВНИИТС, 1959. – С. 100–101.
23. Злобин, Г. П. Формование изделий из порошков твердых сплавов / Г. П. Злобин. – Москва : Metallurgia, 1980. – 224 с.
24. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 624 с.
25. Макаров, Б. В. Пластификация ферритовых порошков / Б. В. Макаров // Порошковая металлургия. – 1979. – № 11. – С. 6–9.
26. Гарднер, Н. Р. Экструзия металлокерамических порошков / Н. Р. Гарднер // Новое в порошковой металлургии. – Москва : Metallurgia, 1970. – С. 101–102.
27. Живов, Л. И. Экструзия титановых сварочных электродов / Л. И. Живов // Цветные металлы. – 1968. – № 2. – С. 84–85.
28. Swartzwelder, J. H. Extrusion of aluminum powder compacts / J. H. Swartzwelder // Int. J. Powder Metallurgy. – 1967. – Vol. 3, № 3. – P. 53–57.
29. Sheppard, T. Densification and pressure requirements during extrusion of atomized aluminum powder / T. Sheppard, A. Greasley // Powder Metallurgy. – 1972. – Vol. 15, № 29. – P. 17.
30. Sheppard, T. Structure and properties of some tin bronzes produced by extrusion of atomized powder / T. Sheppard, A. Greasley // Powder Metallurgy. – 1978. – Vol. 21, № 3. – P. 155.
31. Андриевский, Р. А. Фильтры и пористые изделия / Р. А. Андриевский. – Москва : ЦИТЭИН, 1963. – 187 с.
32. Share, P. Powder Extrusion as a Primary Fabricating Process for Al-Fe Alloys / P. Share, T. Sheppard // Powder Metallurgy. – 1973. – Vol. 16, № 32. – P. 437.
33. Shaker, H. D. Cold extrusion of powder material. Material flow and workpiece properties : proceeding 18th International Machine Tool Design and Research Conference / H. D. Shaker. – London, 1977. – P. 233.
34. Косторнов, А. Г. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – 1966. – № 5. – С. 21–22.
35. Райченко, А. И. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты / А. И. Райченко, А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1966. – № 6. – С. 11–12.
36. Косторнов, А. Г. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – 1966. – № 12. – С. 10–11.
37. Уилкинсон, У. Неньютоновские жидкости / У. Уилкинсон. – Москва : Мир, 1964. – 216 с.
38. Рейнер, М. Деформация и поток / М. Рейнер. – Москва : ИЛ, 1964. – 280 с.
39. Бернхардт, Э. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт. – Москва : Госхимиздат, 1962. – 747 с.
40. Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов. – Москва : Химия, 1977. – 438 с.
41. Виноградов, Г. В. Вязкостные свойства эластомера на примере дивинил-стерильного каучука / Г. В. Виноградов, Б. Догадини, Н. Прозоровская // Коллоидный журнал. – 1968. – Т. 30, № 2. – С. 169–312.
42. Каргин, В. А. Краткие очерки по физико-химии полимеров / В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский. – Москва : Химия, 1967. – 231 с.
43. Косторнов, А. Г. Свойства пластифицированной порошковой смеси и закономерности ее экструзии / А. Г. Косторнов, А. И. Райченко // Порошковая металлургия. – Минск : Выш. школа, 1996. – С. 96–104.
44. Друянов, Б. А. Вязкопластическое течение сжимаемого порошкового материала / Б. А. Друянов // Порошковая металлургия. – 1984. – № 8. – С. 24–27.
45. Гун, Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – Москва : Metallurgia, 1983. – 352 с.

46. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1986. – 688 с.
47. Айзенкольб, Ф. Порошковая металлургия / Ф. Айзенкольб. – Москва, 1959. – 520 с.
48. Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. А. Андриевский. – Киев, 1961. – 420 с.
49. Раковский, В. С. Основы порошкового металловедения / В. С. Раковский. – Москва, 1962. – 88 с.
50. Дорофеев, Ю. Г. Уравнения уплотнения пористых материалов / Ю. Г. Дорофеев // Использование метода динамической металлокерамики в стружковой и порошковой металлургии. – Ростов, 1966. – С. 21–25.
51. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – Москва : Metallurgiya, 1969. – 264 с.
52. Бальшин, М. Ю. Об определении контактного сечения и некоторых механических свойств пористых, порошковых и волокнистых материалов / М. Ю. Бальшин // Порошковая металлургия в новой технике. – Москва : Наука, 1968. – С. 51–55.
53. Бижанов, А. М. Математическое моделирование процесса экструзионного окускования / А. М. Бижанов // Metallurg. – 2023. – № 9. – С. 91–96.
54. Пятов, В. В. Разработка процесса непрерывного формования пористых изделий сложного профиля экструзией порошков на шнековом прессе : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / В. В. Пятов. – Минск, 1988. – 187 с.

REFERENCES

1. Volodin, V. P. Extrusion of profile products from thermoplastics / V. P. Volodin. – St. Petersburg : Profession, 2005. – 480 p.
2. Kim, V. S. Theory and practice of polymer extrusion / V. S. Kim. – Moscow : Chemistry, 2005. – 568 p.
3. Production of cables and wires / N. I. Belorussov [et al.]. – Moscow : Energoizdat, 1981. – 632 p.
4. Pyatov, V. V. Theoretical and technological bases of cold extrusion of powder materials / V. V. Pyatov. – Vitebsk : EE "VGTU", 2002. – 237 p.
5. Sheleg, V. K. Recycling of galvanic waste / V. K. Sheleg, A. S. Kovchur, V. V. Pyatov. – Vitebsk : EE "VGTU", 2004. – 185 p.
6. Matveev, K. S. Thermomechanical recycling of the composition from the waste of sole polyurethane foam by screw extrusion / K. S. Matveev, V. V. Pyatov // Energy- and material-saving environmentally friendly technologies : proceedings of the 8th international scientific and technical conference, Grodno, October 29–30, 2009. : in 2 parts / EE "Ya. Kupala". – Grodno, 2009. – CH. 2. – P. 304–310.
7. Extruder for thermomechanical recycling of waste integral polyurethanes : pat. BY 5320 : MPC (2006) C 08G 18/00 / K. S. Matveev, A. K. Novikov, V. V. Pyatov, S. V. Brovko, A. K. Matveev, A. N. Golubev. – Published. 30.06.2009.
8. Screw extruder for processing of polymer-containing waste : pat. BY 5953 : IPC (2009) B 29C 47/00, C 08G 18/00 / A. K. Novikov, K. S. Matveev, V. V. Pyatov, A. N. Golubev, S. V. Brovko, T. S. Kuksenok. – Published. 28.02.2010.
9. Experimental extruder for processing polymer waste : pat. BY 6093 : MPC (2009) B 29C 47/92 / A. K. Novikov, K. S. Matveev, S. V. Brovko, V. V. Pyatov, A. N. Golubev, A. K. Matveev. – Published. 30.04.2010.
10. Method of processing of rigid polyurethane waste : patent. BY 16053 : MPC C 08J 11/10 (2006.01) / K. S. Matveev, V. V. Pyatov, A. K. Novikov, E. A. Egorova, G. N. Soltovets, A. K. Matveev. – Published 30.06.2012.
11. Ivanchenko, A. I. Calculation of single worm presses / A. I. Ivanchenko. – Kiev, 1962. – 120 p.
12. Kaplun, Ya. B. Forming equipment of extruders / Ya. B. Kaplun, V. S. Kim. – Moscow : Mashinostroenie, 1969. – 160 p.
13. Lukinov, M. I. Production of ceramic drainage pipes / M. I. Lukinov. – Moscow : Stroyizdat, 1981. – 216 p.
14. Production of ceramic sewer pipes / R. M. Zayonts [et al.]. – Moscow : Stroyizdat, 1971. – 172 p.
15. Kashkayev, I. S. Production of clay brick / I. S. Kashkayev, E. Sh. Sheiman. – 3rd ed., rev. and ext. – Moscow : Vysshaya Shkola, 1978. – 248 p.
16. Nichiporenko, S. P. About molding of ceramic masses in belt presses / S. P. Nichiporenko. – Kiev : Naukova Dumka, 1971. – 75 p.
17. Plyushch, G. V. Investigation of regularities of mundustchnogo pressing of metal-ceramic hard alloys : autoref. dis. Candidate of Technical Sciences / G. V. Plyushch. – Kiev, 1970. – 27 p.
18. Refractory compounds / G. V. Samsonov [et al.]. – Moscow : Metallurgy, 1976. – 558 p.
19. Klimenkov, S. S. Theory and technology of extruding rheological powder compositions by screw pressing, equipment creation and implementation in the national economy : a dis. ... Doctor of Technical Sciences : 05.16.06 /

- S. S. Klimenkov. – Minsk, 1991. – 436 p.
20. Balshin, M. Y. Powder metallurgy / M. Y. Balshin. – Moscow, 1938. – 288 p.
 21. Kasparov, A. M. Soviet hard and superhard alloys and ways of their application / A. M. Kasparov. – Moscow, 1932. – 120 p.
 22. Brokhin, I. S. Forming of carbide mixture powders by extrusion method / I. S. Brokhin // *Hard Alloys*. – Moscow : VNIITS, 1959. – P. 100–101.
 23. Zlobin, G. P. Forming of products from hard alloy powders / G. P. Zlobin. – Moscow : Metallurgy, 1980. – 224 p.
 24. Fedorchenko, I. M. Powder metallurgy. Materials, technology, properties, applications / I. M. Fedorchenko. – Kiev : Naukova Dumka, 1985. – 624 p.
 25. Makarov, B. V. Plasticization of ferrite powders / B. V. Makarov // *Powder Metallurgy*. – 1979. – № 11. – P. 6–9.
 26. Gardner, N. R. Extrusion of metal-ceramic powders / N. R. Gardner // *New in powder metallurgy*. – Moscow : Metallurgy, 1970. – P. 101–102.
 27. Zhivov, L. I. Extrusion of titanium welding electrodes / L. I. Zhivov // *Non-Ferrous Metals*. – 1968. – № 2. – P. 84–85.
 28. Swartzwelder, J. H. Extrusion of aluminum powder compacts / J. H. Swartzwelder // *Int. J. Powder Metallurgy*. – 1967. – Vol. 3, № 3. – P. 53–57.
 29. Sheppard, T. Densification and pressure requirements during extrusion of atomized aluminum powder / T. Sheppard, A. Greasley // *Powder Metallurgy*. – 1972. – Vol. 15, № 29. – P. 17.
 30. Sheppard, T. Structure and properties of some tin bronzes produced by extrusion of atomized powder / T. Sheppard, A. Greasley // *Powder Metallurgy*. – 1978. – Vol. 21, № 3. – P. 155.
 31. Andrievskiy, R. A. Filters and porous products / R. A. Andrievskiy. – Moscow : CITEIN, 1963. – 187 p.
 32. Share, P. Powder Extrusion as a Primary Fabricating Process for Al-Fe Alloys / P. Share, T. Sheppard // *Powder Metallurgy*. – 1973. – Vol. 16, № 32. – P. 437.
 33. Shaker, H. D. Cold extrusion of powder material. Material flow and workpiece properties : proceeding 18th International Machine Tool De-sign and Research Conference / H. D. Shaker. – London, 1977. – P. 233.
 34. Kostornov, A. G. Rheological studies of plasticized powder charge / A. G. Kostornov, A. I. Raichenko // *Powder Metallurgy*. – 1966. – № 5. – P. 21–22.
 35. Raichenko, A. I. Rheological studies of plasticized powder charge / A. I. Raichenko, A. G. Kostornov // *Powder Metallurgy*. – 1966. – № 6. – P. 11–12.
 36. Kostornov, A. G. Rheological studies of plasticized powder charge / A. G. Kostornov, A. I. Raichenko // *Powder Metallurgy*. – 1966. – № 12. – P. 10–11.
 37. Wilkinson, W. Non-Newtonian fluids / W. Wilkinson. – Moscow : Mir, 1964. – 216 p.
 38. Reiner, M. Deformation and flow / M. Reiner. – Moscow : IL, 1964. – 280 p.
 39. Bernhardt, E. Processing of thermoplastic materials / E. Bernhardt. – Moscow : Goskhimizdat, 1962. – 747 p.
 40. Vinogradov, G. V. Rheology of polymers / G. V. Vinogradov. – Moscow : Chemistry, 1977. – 438 p.
 41. Vinogradov, G. V. Viscosity properties of elastomer on the example of divinyl-sterile rubber / G. V. Vinogradov, B. Dogadini, N. Prozorovskaya // *Colloid Journal*. – 1968. – T. 30, № 2. – P. 169–312.
 42. Kargin, V. A. Short essays on physico-chemistry of polymers / V. A. Kargin, G. L. Slonimsky. – Moscow : Chemistry, 1967. – 231 p.
 43. Kostornov, A. G. Properties of plasticized powder mixture and regularities of its extrusion / A. G. Kostornov, A. I. Raichenko // *Powder Metallurgy*. – Minsk : Vysh. school, 1996. – P. 96–104.
 44. Druyanov, B. A. Viscoplastic flow of compressible powder material / B. A. Druyanov // *Powder Metallurgy*. – 1984. – № 8. – P. 24–27.
 45. Gun, G. Ya. Mathematical modeling of metal forming processes / G. Ya. Gun. – Moscow : Metallurgy, 1983. – 352 p.
 46. Kolmogorov, V. L. Mechanics of metal processing by pressure / V. L. Kolmogorov. – Moscow : Metallurgy, 1986. – 688 p.
 47. Eisenkolb, F. Powder metallurgy / F. Eisenkolb. – Moscow, 1959. – 520 p.
 48. Fedorchenko, I. M. Fundamentals of powder metallurgy / I. M. Fedorchenko, R. A. Andrievskiy. – Kiev, 1961. – 420 p.
 49. Rakovsky, V. S. Fundamentals of powder metallurgy / V. S. Rakovsky. – Moscow, 1962. – 88 p.
 50. Dorofeev, Yu. G. Equations of compaction of porous materials / Yu. G. Dorofeev // *Use of dynamic metal-ceramic method in chip and powder metallurgy*. – Rostov, 1966. – P. 21–25.
 51. Zhdanovich, G. M. Theory of pressing metal powders / G. M. Zhdanovich. – Moscow : Metallurgy, 1969. – 264 p.
 52. Balshin, M. Yu. On determination of contact section and some mechanical properties of porous, powder

- and fiber materials / M. Yu. Balshin // Powder metallurgy in new technology. – Moscow : Nauka, 1968. – P. 51–55.
53. Bizhanov, A. M. Mathematical modeling of the extrusion pelletizing process / A. M. Bizhanov // Metallurg. – 2023. – № 9. – P. 91–96.
54. Pyatov, V. V. Development of the process of continuous molding of porous products of a complex profile by powder extrusion on a screw press : Cand. Candidate of Technical Sciences : 05.16.06 / V. V. Pyatov. – Minsk, 1988. – 187 p.

SPISOK LITERATURY

1. Volodin, V. P. Jekstruzija profil'nyh izdelij iz termoplastov / V. P. Volodin. – Sankt-Peterburg : Professija, 2005. – 480 s.
2. Kim, V. S. Teorija i praktika jekstruzii polimerov / V. S. Kim. – Moskva : Himija, 2005. – 568 s.
3. Proizvodstvo kabelej i provodov / N. I. Belorussov [i dr.]. – Moskva : Jenergoizdat, 1981. – 632 s.
4. Pjatov, V.V. Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy holodnoj jekstruzii poroshkovykh materialov / V.V. Pjatov. – Vitebsk : UO «VGTU», 2002. – 237 s.
5. Sheleg, V. K. Pererabotka gal'vanootodov / V. K. Sheleg, A. S. Kovchur, V. V. Pjatov. – Vitebsk : UO «VGTU», 2004. – 185 s.
6. Matveev, K. S. Termomehanicheskiy recikling kompozicii iz othodov podoshvennyh penopoliiuretanov shnekovoj jekstruziej / K. S. Matveev, V. V. Pjatov // Jenergo- i materialosberegajushhie jekologicheski chistye tehnologii : materialy 8 mezhdunar. nauch.-teh. konf., Grodno, 29–30 oktyabrya 2009 g. : v 2 ch. / UO «GrGU im. Ya. Kupaly». – Grodno, 2009. – Ch. 2. – S. 304-310.
7. Jekstruder dlja termomehanicheskogo reciklinga othodov integral'nyh poliuretanov : pat. BY 5320 : MPK (2006) C 08G 18/00 / K. S. Matveev, A. K. Novikov, V. V. Pjatov, S. V. Brovko, A. K. Matveev, A. N. Golubev. – Opubl. 30.06.2009.
8. Shnekovyy jekstruder dlja pererabotki polimersoderzhashhih othodov : pat. BY 5953 : MPK (2009) B 29C 47/00, C 08G 18/00 / A. K. Novikov, K. S. Matveev, V. V. Pjatov, A. N. Golubev, S. V. Brovko, T. S. Kuksenok. – Opubl. 28.02.2010.
9. Jeksperimental'nyj jekstruder dlja pererabotki polimernykh othodov : pat. BY 6093 : MPK (2009) B 29C 47/92 / A. K. Novikov, K. S. Matveev, S. V. Brovko, V. V. Pjatov, A. N. Golubev, A. K. Matveev. – Opubl. 30.04.2010.
10. Sposob pererabotki othodov zhestkiykh poliuretanov : pat. BY 16053 : MPK C 08J 11/10 (2006.01) / K. S. Matveev, V. V. Pyatov, A. K. Novikov, E. A. Egorova, G. N. Soltovec, A. K. Matveev. – Opubl. 30.06.2012.
11. Ivanchenko, A. I. Raschet odnocheryyachnykh pressov / A. I. Ivanchenko. – Kiev, 1962. – 120 s.
12. Kaplun, Ya. B. Formuyushchee oborudovanie ekstruderov / Ya. B. Kaplun, V. S. Kim. – Moskva : Mashinostroenie, 1969. – 160 s.
13. Lukinov, M. I. Proizvodstvo keramicheskikh drenaznykh trub / M. I. Lukinov. – Moskva : Strojizdat, 1981. – 216 s.
14. Proizvodstvo keramicheskikh kanalizacionnykh trub / R. M. Zajonc [i dr.]. – Moskva : Strojizdat, 1971. – 172 s.
15. Kashkaev, I. S. Proizvodstvo glinyanogo kirpicha / I. S. Kashkaev, E. Sh. Shejman. – 3-e izd., pererab. i dop. – Moskva : Vysshaya shkola, 1978. – 248 s.
16. Nichiporenko, S. P. O formovanii keramicheskikh mass v lentochnykh pressah / S. P. Nichiporenko. – Kiev : Naukova dumka, 1971. – 75 s.
17. Plyushch, G. V. Issledovanie zakonomernostej mundstuchnogo pressovaniya metallokeramicheskikh tverdykh splavov : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / G. V. Plyushch. – Kiev, 1970. – 27 s.
18. Tugoplavkie soedineniya / G. V. Samsonov [i dr.]. – Moskva : Metallurgiya, 1976. – 558 s.
19. Klimenkov, S. S. Teoriya i tekhnologiya ekstrudirovaniya reologicheskikh poroshkovykh kompozicij metodom shnekovogo pressovaniya, sozдание oborudovaniya i vnedrenie v narodnoe hozyajstvo : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.16.06 / S. S. Klimenkov. – Minsk, 1991. – 436 s.
20. Bal'shin, M. Yu. Poroshkovaya metallurgiya / M. Yu. Bal'shin. – Moskva, 1938. – 288 s.
21. Kasparov, A. M. Sovetskie tverdye i sverhtverdye splavy i sposoby ih primeneniya / A. M. Kasparov. – Moskva, 1932. – 120 s.
22. Brohin, I. S. Formovanie poroshkov tverdosplavnykh smesey metodom vydavlivaniya / I. S. Brohin // Tverdye splavy. – Moskva : VNIITS, 1959. – S. 100–101.
23. Zlobin, G. P. Formovanie izdelij iz poroshkov tverdykh splavov / G. P. Zlobin. – Moskva : Metallurgiya, 1980. – 224 s.
24. Fedorchenko, I. M. Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svojstva, oblasti primeneniya / I. M. Fedorchenko. – Kiev : Naukova dumka, 1985. – 624 s.

25. Makarov, B. V. Plastifikaciya ferritovyh poroshkov / B. V. Makarov // Poroshkovaya metallurgiya. – 1979. – № 11. – S. 6–9.
26. Gardner, N. R. Ekstruziya metallokeramicheskikh poroshkov / N. R. Gardner // Novoe v poroshkovo metallurgii. – Moskva : Metallurgiya, 1970. – S. 101–102.
27. Zhivov, L. I. Ekstruziya titanovyh svarochnykh elektrodov / L. I. Zhivov // Cvetnye metally. – 1968. – № 2. – S. 84–85.
28. Swartzwelder, J. H. Extrusion of aluminum powder compacts / J. H. Swartzwelder // Int. J. Powder Metallurgy. – 1967. – Vol. 3, № 3. – P. 53–57.
29. Sheppard, T. Densification and pressure requirements during extrusion of atomized aluminum powder / T. Sheppard, A. Greasley // Powder Metallurgy. – 1972. – Vol. 15, № 29. – P. 17.
30. Sheppard, T. Structure and properties of some tin bronzes produced by extrusion of atomized powder / T. Sheppard, A. Greasley // Powder Metallurgy. – 1978. – Vol. 21, № 3. – P. 155.
31. Andrievskij, R. A. Fil'try i poristye izdeliya / R. A. Andrievskij. – Moskva : CITEIN, 1963. – 187 s.
32. Share, P. Powder Extrusion as a Primary Fabricating Process for Al-Fe Alloys / P. Share, T. Sheppard // Powder Metallurgy. – 1973. – Vol. 16, № 32. – P. 437.
33. Shaker, H. D. Cold extrusion of powder material. Material flow and workpiece properties : proceeding 18th International Machine Tool Design and Research Conference / H. D. Shaker. – London, 1977. – P. 233.
34. Kostornov, A. G. Reologicheskie issledovaniya plastificirovannoj poroshkovo shipty / A. G. Kostornov, A. I. Rajchenko // Poroshkovaya metallurgiya. – 1966. – № 5. – S. 21–22.
35. Rajchenko, A. I. Reologicheskie issledovaniya plastificirovannoj poroshkovo shipty / A. I. Rajchenko, A. G. Kostornov // Poroshkovaya metallurgiya. – 1966. – № 6. – S. 11–12.
36. Kostornov, A. G. Reologicheskie issledovaniya plastificirovannoj poroshkovo shipty / A. G. Kostornov, A. I. Rajchenko // Poroshkovaya metallurgiya. – 1966. – № 12. – S. 10–11.
37. Uilkinson, U. Nen'yutonovskie zhidkosti / U. Uilkinson. – Moskva : Mir, 1964. – 216 s.
38. Rejner, M. Deformaciya i potok / M. Rejner. – Moskva : IL, 1964. – 280 s.
39. Bernhardt, E. Pererabotka termoplastichnyh materialov / E. Bernhardt. – Moskva : Goskhimizdat, 1962. – 747 s.
40. Vinogradov, G. V. Reologiya polimerov / G. V. Vinogradov. – Moskva : Himiya, 1977. – 438 s.
41. Vinogradov, G. V. Vyazkostnye svoystva elastomera na primere divinil-steril'nogo kauchuka / G. V. Vinogradov, B. Dogadini, N. Prozorovskaya // Kolloidnyj zhurnal. – 1968. – T. 30, № 2. – S. 169–312.
42. Kargin, V. A. Kratkie ocherki po fiziko-himii polimerov / V. A. Kargin, G. L. Slonimskij. – Moskva : Himiya, 1967. – 231 s.
43. Kostornov, A. G. Svoystva plastificirovannoj poroshkovo smesi i zakonmernosti ee ekstruzii / A. G. Kostornov, A. I. Rajchenko // Poroshkovaya metallurgiya. – Minsk : Vysh. shkola, 1996. – S. 96–104.
44. Druyanov, B. A. Vyazkoplasticheskoe techenie szhimaemogo poroshkovogo materiala / B. A. Druyanov // Poroshkovaya metallurgiya. – 1984. – № 8. – S. 24–27.
45. Gun, G. Ya. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem / G. Ya. Gun. – Moskva : Metallurgiya, 1983. – 352 s.
46. Kolmogorov, V. L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem / V. L. Kolmogorov. – Moskva : Metallurgiya, 1986. – 688 s.
47. Ajzenkol'b, F. Poroshkovaya metallurgiya / F. Ajzenkol'b. – Moskva, 1959. – 520 s.
48. Fedorchenko, I. M. Osnovy poroshkovo metallurgii / I. M. Fedorchenko, R. A. Andrievskij. – Kiev, 1961. – 420 s.
49. Rakovskij, V. S. Osnovy poroshkovogo metallovedeniya / V. S. Rakovskij. – Moskva, 1962. – 88 s.
50. Dorofeev, Yu. G. Uravneniya uplotneniya poristykh materialov / Yu. G. Dorofeev // Ispol'zovanie metoda dinamicheskoy metallokeramiki v struzhkovo i poroshkovo metallurgii. – Rostov, 1966. – S. 21–25.
51. Zhdanovich, G. M. Teoriya pressovaniya metallicheskih poroshkov / G. M. Zhdanovich. – Moskva : Metallurgiya, 1969. – 264 s.
52. Bal'shin, M. Yu. Ob opredelenii kontaktnogo secheniya i nekotoryh mekhanicheskikh svoystv poristykh, poroshkovykh i voloknistykh materialov / M. Yu. Bal'shin // Poroshkovaya metallurgiya v novoy tekhnike. – Moskva : Nauka, 1968. – S. 51–55.
53. Bizhanov, A. M. Matematicheskoe modelirovanie processa ekstruzionnogo okuskovaniya / A. M. Bizhanov // Metallurg. – 2023. – № 9. – S. 91–96.
54. Pyatov, V. V. Razrabotka processa nepreryvnogo formovaniya poristykh izdelij slozhnogo profilya ekstruziej poroshkov na shnekovom presse : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.16.06 / V. V. Pyatov. – Minsk, 1988. – 187 s.

Статья поступила в редакцию 08.12.2023.