

# ОСОБЕННОСТИ КОМПАКТИРОВАНИЯ В ПРЕСС-ФОРМАХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА И ВОЛЬФРАМА

## FEATURES OF COMPACTION IN THE PRESS-DIES COMPOSITIONS ON THE BASIS CARBON AND TUNGSTEN

М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов, В.Г. Шеркунов  
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)  
г. Челябинск, пр. Ленина, 76.  
[vasilij.a.ivanov@gmail.com](mailto:vasilij.a.ivanov@gmail.com)

### Abstract

*This paper presents an analysis process based on the properties of the powders of carbon and tungsten, and methods for producing semi-finished products of them. It was revealed that the most common and effective way is to compaction of powder compositions of tungsten and carbon in press-dies. Carbon and tungsten powders have a several special properties that significantly affect the quality of semi-finished and require special organization of the production cycle. Thus the self-diffusion coefficients of the low carbon and tungsten, a high elastic modulus require plasticizers and binders, for acceptable strength of semifinished after compaction. High adsorptive capacity of the powdered compositions, is the cause of low pour density and a large amount of gases which must be removed from the press-die cavity during the compaction. Speeds punch during compaction tungsten limited 2–2.5 mm/s, the preform obtained by compacting high speeds have defects such as cracks. For continuous preparations of graphite requires prolonged high-temperature processing. Powder compacting after harvesting have significant porosity and require further thermomechanical processing.*

### Введение

Если в качестве критерия тугоплавкости принять температуру плавления, превышающую

1800 °С, как это сделано в работе [1], то к тугоплавким можно отнести материалы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства тугоплавких материалов [1]

Элемент	Температура плавления, °С	Модуль упругости, ГПа	Плотность, г/мм <sup>3</sup>	Твердость, ГПа
Углерод	3770	1155	2,26	100
Вольфрам	3410	405	19,35	3
Рений	3180	470	21,01	2,5
Тантал	2996	190	16,65	0,9
Молибден	2620	323	10,22	1,7
Ниобий	2465	115	8,57	0,6
Гафний	2220	140	13,31	1,0
Цирконий	1860	130	6,51	–

Как видно из табл. 1, самым тугоплавким материалом является углерод, а поскольку он не плавится, то в табл. 1 указана температура начала его сублимации. Следует отметить, что в последнее время появляется все больше публикаций об экспериментальных исследованиях по получению жидкого углерода. Так, в статье академика А.И. Савватимского [2] приводится наиболее достоверная температура плавления разновидности углерода – графита при давлениях 0,1 – 3,0 кбар, равная 4800 – 4900 К.

Известно, что углерод является уникальным элементом периодической системы, его начали применять уже у истоков человеческой цивилизации. Из углерода в виде сажи еще в XVI веке до нашей эры в Египте изготавливали чернила, а в Китае – порох. Промышленная революция в мире началась с использования углерода в виде твердого топлива в промышленном производстве, восстановителя оксидов железа в металлургии, деталей изделий в электротехнике [3]. С середины

XIX века в обобщенный термин углеграфитовые материалы входит углерод в виде природных и искусственных углей, нефтяных и пековых коксов, сажи (технического углерода), углерода из полимеров и т.д. [4]

Углеграфитовые материалы отличаются уникальным набором химических, физических и механических свойств, которые делают их незаменимыми в металлургии как черной, так и цветной, электроэнергетике и электротехнике, химии, машиностроении, атомной энергетике и ракетно-космической технике [4]. Вот что пишет известный американский ученый F.H. Froes из института материалов и новейших процессов при университете Айдахо в США [5]: «Основное преимущество углеродных композиционных материалов заключается в том, что они незначительно теряют прочность даже при температуре выше 2500 °С. Поэтому в 21 веке эти материалы станут ключевыми материалами аэрокосмических аппаратов и систем».

Вольфрам также обладает уникальными свойствами: самой высокой среди металлов температурой плавления, которая определяет его высокую прочность в воздушной атмосфере до температуры 2000 °С, а в защитной атмосфере – до 3000 °С; самой высокой среди тугоплавких металлов теплопроводностью; самым низким среди тугоплавких металлов коэффициентом линейного расширения; самым низким, кроме Мо, удельным электрическим сопротивлением; высокой эмиссией электронов. Эти свойства и определяют использование вольфрама и композиций на его основе в современной электровакуумной, электронной и рентгеновской технике, в авиационной, ракетной и космической технике. Вот какие области промышленного применения вольфрама в XXI веке названы на международном симпозиуме, проходившем в США в 2002 году [6]: «вольфрамовая проволока, электроды, различные изделия, находящие применение в светотехнике,

электротехнике, электронике, нагревательных устройствах; легированный вольфрам используется преимущественно в военно-промышленном комплексе при производстве систем вооружений, ракет, снарядов, пуль; вольфрам в качестве легирующего элемента находит применение при производстве специальных сталей, суперсплавов на основе никеля и кобальта».

Отмеченные уникальные свойства композиций на основе углерода и вольфрама позволили использовать именно эти материалы для изготовления первого международного экспериментального термоядерного реактора, схема которого показана на рис. 1 [7]. В правой части рис. 1 показан главный агрегат реактора, называемый «divertor», изготовленный из гетерогенных композиций вольфрама и углерод-углеродных композиций. Эти материалы способны противостоять высоким термомеханическим нагрузкам.

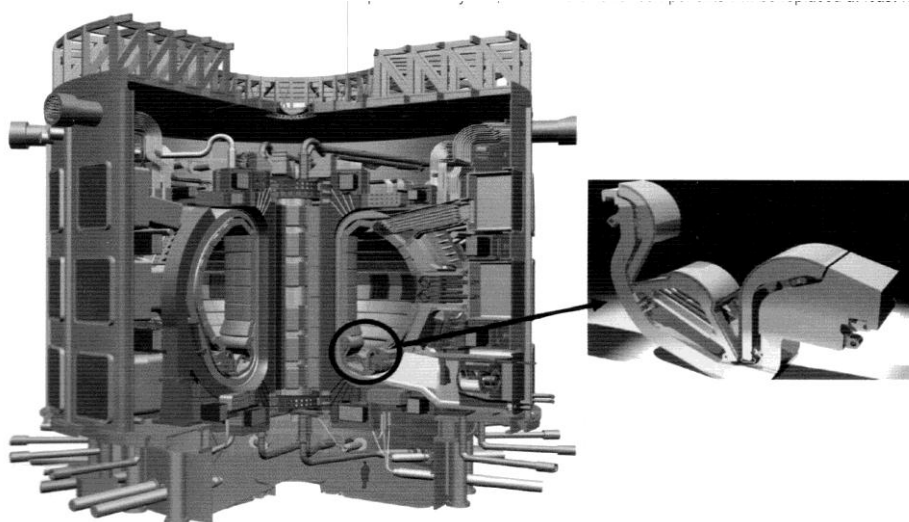


Рис. 1. Схема первого варианта экспериментального термоядерного реактора, изготовленного в 2007 г. фирмой PLANSEE

Особые свойства композиций на основе углерода и вольфрама приводят к особенностям процесса компактирования этих порошковых материалов.

#### **Особенности компактирования порошковых композиций на основе углерода**

Самым первым способом компактирования порошковых композиций на основе углерода был способ формования изделий типа электродов для ламп накаливания, в пресс-формах. В России этот способ применили еще в 1874 г. на небольшом заводе в г. Кинешма, а в 1879 г. уже на крупном по тому времени заводе в г. Кудинове (ныне г. Электроугли) в пресс-формах начали формовать щетки электрических машин [8]. Американская компания по производству электродов для ламп накаливания щеток BRUSH была основана только в 1881 г. [9]. В 1892 г. во Франции была создана фирма CARBONE LORRAINE, которая в

настоящее время входит в MERSEN GROUP и является мировым лидером в производстве щеток электрических машин [10]. Немецкая компания SCHUNK по выпуску щеток электрических машин была основана в 1913 г. [11].

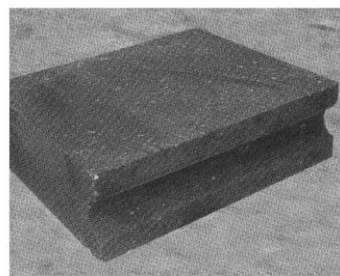
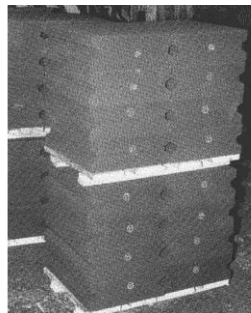
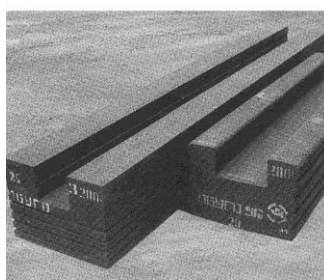
В 1933 г. в России начал работать первый отечественный Московский электродный завод (МЭЗ) [12]. В настоящее время в группу компаний «Энергопром» [13] входят Челябинский, Новочеркасский, Новосибирский электродные заводы, Донкарб Графит и Авиауглерод. Эти предприятия выпускают электродную, катодную и другую углеграфитовую продукцию для черной металлургии, алюминиевой, ферросплавной, кремниевой, химической, машиностроительной и атомной промышленности. Основной продукцией группы компаний являются графитованные электроды, используемые в электродуговых печах при выплавке сталей и сплавов (рис. 2а). Большой объем продукции занимают катодные подовые,

боковые и угловые блоки, предназначенные для футеровки ванн и стенок устройств для электролиза алюминия (рис. 2б). Группа компаний производит

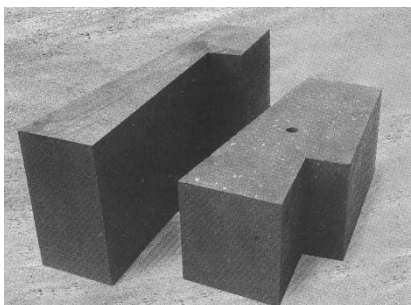
также значительный объем блоков для футеровки доменных печей (рис. 2в).



а



б



в

Рис. 2. Продукция группы компаний «Энергопром» [13]: а – графитированные электроды; б – катодные блоки электролизеров; в – доменные блоки

В больших объемах компактированием изготавливаются из композиций на основе графита изделия конструкционного назначения: для ядерных реакторов, цветной металлургии, химической промышленности, вакуумной техники, машиностроения и ракетной техники [13-17].

К основным способам компактирования композиций на основе углерода, как следует из трудов самых известных ученых в области углеграфитовых материалов Е.Ф. Чалых [18] и А.С. Фиалкова [4], относятся: прессование компактированием композиций в пресс-формах и прессование выдавливанием через мундштук композиций из контейнера пресса. В ряде случаев для получения крупногабаритных изделий из конструктивных углеродных композиций используются способы вибрационного компактирования и компактирования изостатическим прессованием [4].

Основным достоинством и особенностью этого способа является возможность получения

повышенной плотности и прочности заготовок и изделий по сравнению с другим основным способом компактирования – выдавливанием изделий через мундштук из контейнера.

На рис. 3 показаны некоторые варианты способа компактирования в пресс-формах изделий самой простой геометрической формы (таблеток, цилиндров, заготовок квадратного и прямоугольного сечений). Способ одностороннего прессования (рис. 3а) самый простой для практической реализации, но имеет существенные недостатки. Во-первых, плотность, механические и физические свойства полученных изделий зависят от геометрических размеров прессовок по сечению и высоте, от сложности формы и массы. Геометрические размеры и масса заготовок и изделий определяют характер неоднородности их плотности, а следовательно физических и механических свойств. Одной из причин неоднородности плотности и свойств изделий является наличие в процессе компактирования на

боковых стенках матрицы реактивных сил трения при контакте порошков со стенками матрицы. Частично устранить этот недостаток позволяет второй вариант способа компактирования (рис. 3б) в матрице с подвижными стенками. Более существенно повлиять на неоднородность плотности и свойств изделий может способ двухстороннего прессования (рис. 3в). Однако, этот

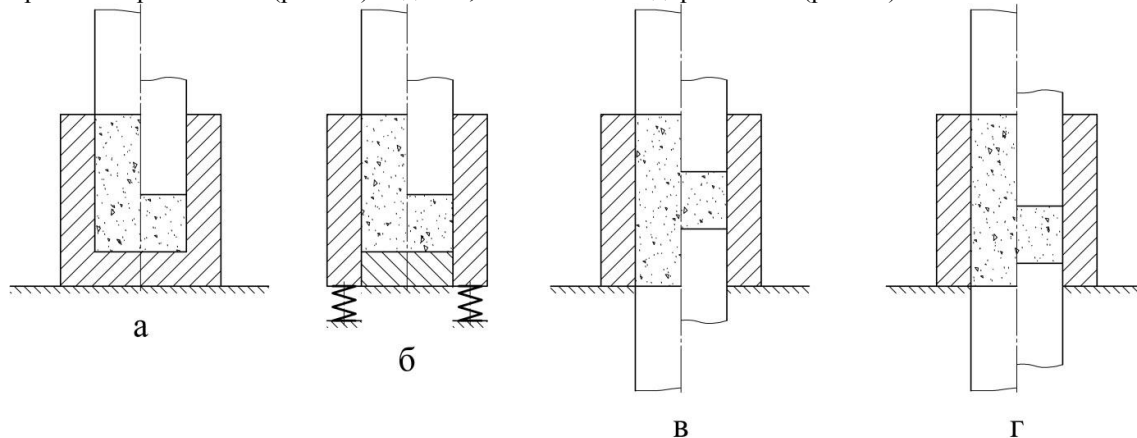


Рис. 3. Способы компактирования порошковых композиций в пресс-формах:  
а – одностороннее прессование; б – одностороннее прессование в матрице с подвижными стенками; в –  
двухстороннее прессование; г – прессование с подпрессовкой

Второй существенный недостаток способа, снижающий плотность изделий и ухудшающий их свойства, заключается в особенности свойств порошковых композиций, выраженной наличием в исходной порошковой композиции и в засыпке ее в пресс-форму большого объема газов и паров жидкостей. Известно, что порошковые композиции на основе углерода, особенно мелкозернистые, обладают высокой склонностью к адсорбции газов и паров [19]. Эти газы и пары в процессе прессования должны хотя бы частично быть удалены. Процесс их удаления зависит от свойств порошковой композиции, ее гранулометрического состава, а также от параметров процесса прессования, от геометрических размеров, формы и массы прессовки.

способ требует использования специального сложного по конструкции и дорогого оборудования, поэтому используется только при массовом производстве изделий. При производстве изделий малой высоты и большого сечения может использоваться способ одностороннего прессования с последующей обратной подпрессовкой (рис. 3г).

Особенностью порошковых композиций на основе углерода, используемых в промышленности, является также то, что исходные порошки коксов, природных и искусственных графитов относятся к крупнозернистым порошковым материалам, поскольку размеры их отдельных частиц могут достигать 20 мм. Для получения нужного гранулометрического состава порошков, заданного размера частиц и их формы все коксовые и графитовые исходные материалы подвергаются измельчению. В табл. 2 приведен гранулометрический состав коксовых порошков, предназначенных для электродного производства [4]. Как видно из табл. 2, даже изделия одного типа, но разных размеров изготавливают из порошков разных гранулометрических составов со средними размерами частиц от 0,33 мм до 1,52 мм.

Таблица 2

Гранулометрический состав коксовых порошков, применяемых для получения электродов

Диаметр электрода, мм	Массовая доля частиц в сухой смеси, %			
	< 0,06 мм	0,3–0,6 мм	0,6–1,5 мм	1,5–3,0 мм
70	80	20	–	–
200	45	15	40	–
300	45	–	30	25
500	45	–	20	35

Поскольку частицы коксов отличаются хрупкостью, не обладают способностью уплотняться без разрушений, то для приготовления композиций, пригодных для пластической деформации, к порошкам коксов необходимо добавлять большую объемную долю

пластификатора. На рис. 4 приведена зависимость плотности спрессованных, спеченных и графитированных образцов от содержания пластификатора (пека) в композиции нефтяной кокс-каменноугольный пек [4].

Из рис. 4 видно, что наибольшая плотность электродов после графитации достигается при объемной доле пластификатора в виде пека в

порошке нефтяного кокса, равной 50 %. Это является важной особенностью композиций на основе углерода.

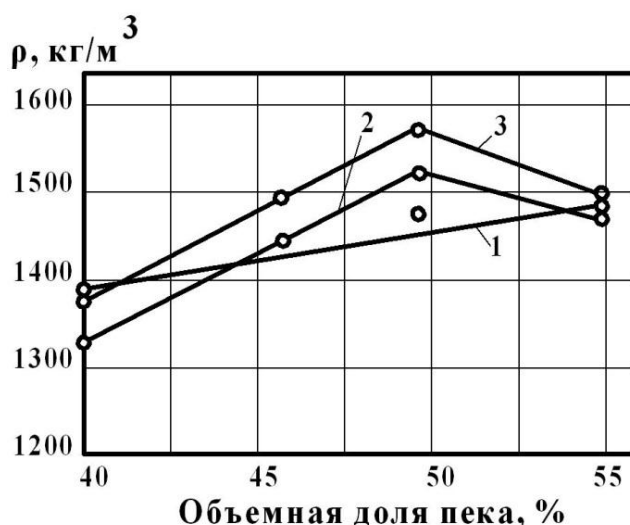


Рис. 4. Зависимость плотности спрессованных (1), спеченных (2) и графитированных (3) образцов от содержания среднетемпературного каменноугольного пека

Учеными НИИ графита в работе [20] представлены результаты исследования уплотнения коксо-пековой композиции, содержащей кокс марки КНПС и от 0 до 30 % среднетемпературного пека, и относящейся к конструкционным графитам. Гранулометрический состав порошка кося следующий: частиц менее 0,09 мм – 47 %; 0,15–0,3 мм – 27 % и 0,5–1,5 мм – 26 %. При таком гранулометрическом составе порошка кокса из композиции получали прессовки высотой 40–45 мм и диаметром 40 мм наибольшей плотности, равной  $1,83 \text{ г/см}^3$  при содержании пека 18 %, температуре компактирования 120–125 °С и удельном давлении  $320 \text{ кг/см}^2$ . Горячее компактирование является одной из важных особенностей получения изделий и композиций на основе углерода.

Одним из соавторов доклада исследовались свойства и гранулометрический состав графитовых порошков по ТУ 1916-109-71-2000, предназначенных для получения изделий электротехнического назначения (электрошетки, вставки для токосъема городского и железнодорожного транспорта и др.). Исследования выполнены на установке Alpara 500 NANO [21] в

техническом центре машиностроения (СЕТИМ) в г. Saint-Etienne во Франции [22]. В результате исследования гранулометрического состава частиц графита (рис. 5) установлено, что частиц размером менее 50 мкм – 12,5 %, частиц в диапазоне от 50 до 100 мкм – 5,3 % и частиц от 100 до 450 мкм – 82,2 %. Средний размер частиц равен 280 мкм. Насыпная плотность исследованного порошка равна  $0,67 \text{ г/см}^3$ .

В ряде публикаций авторов статьи [23–26] приведены результаты исследования уплотняемости композиции 86 % графита и 14 % ФФС при статическом и высокоэнергетическом компактировании. Исследования выполнены в процессах горячего компактирования в разъемных пресс-формах изделий электротехнического назначения. На вставках токосъемников троллейбусов и пантографов трамваев после компактирования получена плотность в пределах  $1,55\text{--}1,60 \text{ г/см}^3$ , что составляет 0,68–0,70 от беспористого графита, что можно также отнести к особенностям статического компактирования.

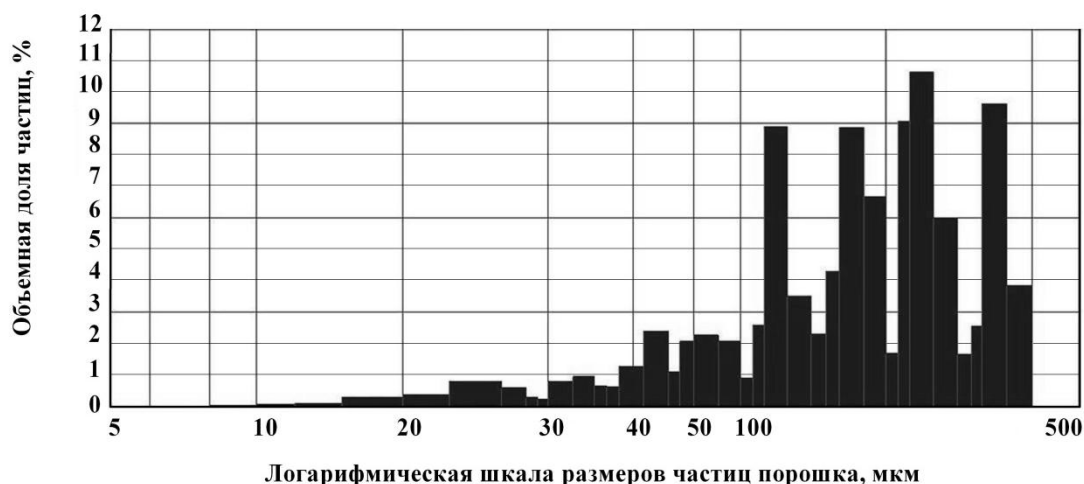


Рис. 5. Распределение размерного ряда частиц насыпки порошка по объему

При высокоэнергетическом компактировании плотность прессовок достигает  $1,76 \text{ г/см}^3$ , что составляет уже 0,80 от беспористого графита.

Еще одна особенность компактирования порошковых композиций на основе углерода связана с конструкцией пресс-форм. На рис. 6 показана пресс-форма и прессовка в виде блока для получения самого массового изделия

электротехнического назначения — щетки электродвигателей [8].

На этой пресс-форме выполняется способ одностороннего прессования в матрице с подвижными стенками (рис. 3б), а особенностью ее является использование замкнутой неразборной матрицы с полостью квадратного поперечного сечения.

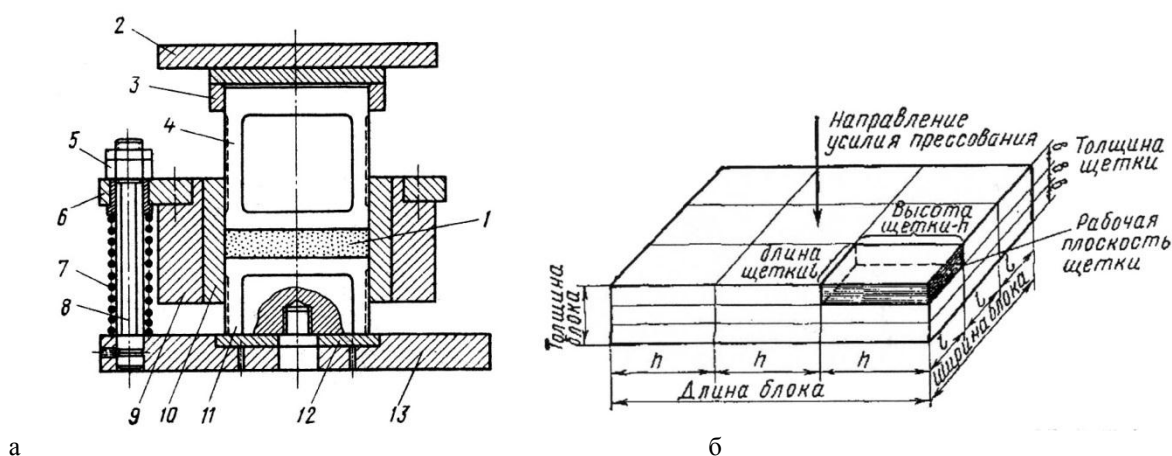


Рис. 6. Конструкция пресс-формы (а) и схема раскроя прессовки-блока заготовок электрощеток (б) возглавляемая доктором В.Д. Кулиджем [28]. Способ получения вольфрамовых штабиков В.Д.

### Особенности компактирования порошков и порошковых композиций на основе вольфрама

Первой в мире производство порошков вольфрама и технологию их холодного компактирования в разъемных пресс-формах для получения заготовок (штабиков сечениями от 6х6 до 25х25 мм и длиной от 200 до 600 мм) в начале прошлого века освоила американская фирма General Electric (GE) [7,27]. Разработчиком технологии холодного компактирования порошков вольфрама и операций последующего получения из них проволоки для ламп накаливания была исследовательская лаборатория фирмы GE,

Кулиджа основан на классическом способе статического формования, выполняемом в разборной пресс-форме на гидравлическом прессе со скоростью движения плунжера и пуансона пресс-формы, равной 2 мм/с [6]. Разработанная В.Д. Кулиджем разборная пресс-форма показана на рис. 7. Пресс-форма состоит из двух боковин, пуансона и стяжек. В одной из боковин выполнена полость для засыпки порошковой смеси, а сборка боковин выполняется с помощью четырех штифтов. После сборки пресс-форма заполняется порошком, на порошок устанавливается пуансон, а пресс-форма помещается в рабочее пространство

специализированного гидравлического пресса с вертикальными и горизонтальными плунжерами. Горизонтальный плунжер запирает щеки пресс-

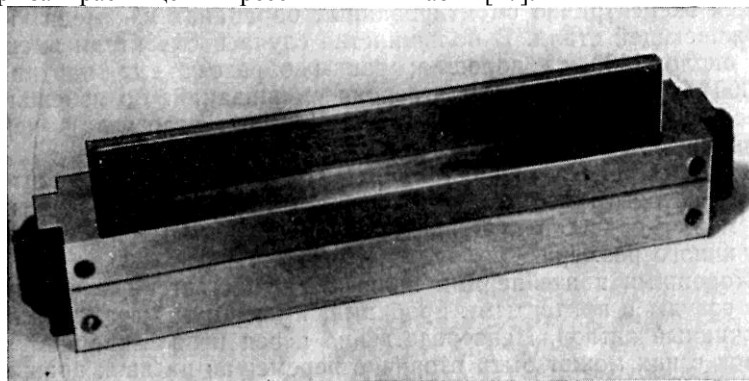


Рис. 7. Разборная пресс-форма конструкции В.Д. Кулиджа

Аналогичные американским гидравлические прессы отечественного производства установлены на предприятиях России, выпускающих изделия из тугоплавких металлов. Уже в 30-40 годы прошлого века в число таких предприятий входили Московский электроламповый завод (в настоящее время МЗЭВП), завод «Победит» (г. Владикавказ), предприятие «ЭлМаш» (г.Саратов) и др. Отечественный специализированный гидравлический пресс с горизонтальным и вертикальным плунжерами, используемый на этих предприятиях, описан в монографии [29]. На

формы, а вертикальный воздействует на пуансон пресс-формы и его усилие формирует из порошка штабик [27].

рабочий стол такого прессы устанавливается пресс-форма отечественной конструкции (рис. 8). В этой пресс-форме из порошка вольфрама, пластифицированного раствором глицерина в спирт, формируются штабики сечением от 10х10 до 40х40 мм и длиной 350-500 мм. При формировании объем порошка в полости уменьшается в 3-4 раза. Удельное усилие прессования для разных размеров штабиков из рядовых марок порошков вольфрама находится в пределах от 250 до 500 МПа. Получаемые штабики имеют плотность от 12 до 13 г/см<sup>3</sup>, т.е. их пористость равна 30-40 % [6].

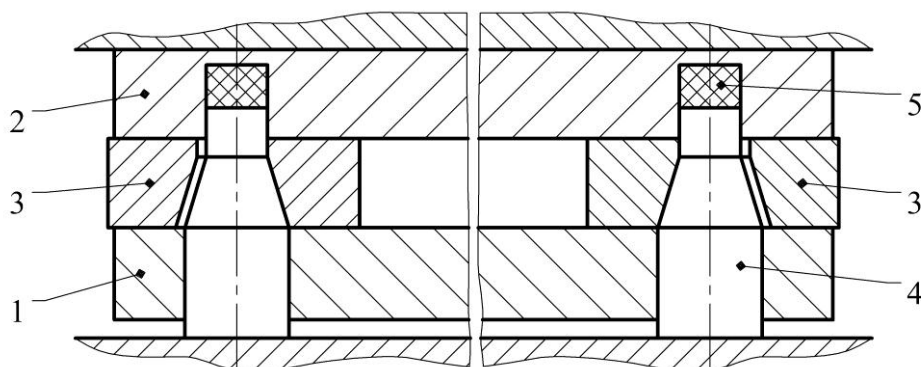


Рис. 8. Пресс-форма для формирования порошков [30]

Работает пресс-форма, показанная на рис.8, следующим образом. В полость пресс-формы засыпают порошок и на порошок устанавливают верхний пуансон. Затем пресс-форма помещается на рабочий стол прессы, снабженного горизонтальным и вертикальным плунжерами. Перед началом формирования из порошка штабика усилием горизонтального плунжера щеки пресс-формы 1 и 2 и боковые пластины 3 зажимают. При этом в качестве направляющих используются пальцы 4, части пальцев меньшего диаметра сжимают упругие элементы 5.

Пресс-форма, конструкция которой показана на рис. 8, имеет важное преимущество перед пресс-формой В.Д. Кулиджа. После прессования пресс-форма разбирается и штабик свободно извлекается, в то время как в полости пресс-формы В.Д.

Кулиджа штабик после прессования заклинивается от действия упругих напряжений и при извлечении часто разрушается.

На основе изложенного можно отметить уже ряд особенностей компактирования в пресс-формах порошковых композиций на основе вольфрама [31, 32]:

- в настоящее время отечественные предприятия и зарубежные фирмы компактированием получают штабики преимущественно прямоугольного и квадратного сечений (от 10х10 до 40х40 мм) и длиной от 350 до 650 мм, используемые для получения изделий, а также слитков;

- указанные штабики удовлетворительного качества можно получить только в разборных пресс-формах с

саморегулируемым размером полости пресс-формы;

– удовлетворительного качества штабики можно получить только компактированием в узких диапазонах изменения кинематических (скорость верхнего пуансона пресс-формы равна 2,0-2,5 мм/с) и силовых параметров (удельное давление прессования для штабиков разных сечений находится в пределах от 200 до 650 МПа).

Начиная с 70-х годов прошлого века сотрудниками кафедры Митомд ЮУрГУ выполнен большой объем экспериментальных, теоретических исследований способов статического формования штабиков из порошков и порошковых композиций на основе вольфрама, а также изобретены новые составы композиций с наночастицами, новые конструкции пресс-форм для формования из них штабиков и штабики новой геометрической формы. Все это позволило выявить и другие особенности компактирования порошков

и гетерогенных порошковых композиций на основе вольфрама в пресс-формах.

В работе [33] приведены результаты промышленных исследований процесса компактирования штабиков из порошка чистого вольфрама марки ВЧ. Насыпная плотность, средний размер зерна по Фишеру и условия прессования указаны в табл. 3.

Из табл. 3 следуют особенности порошка чистого вольфрама: низкая насыпная плотность (поры составляют 74–78 %), малый средний размер зерен, низкая плотность получаемых штабиков, едва превышающая 60 % от плотности беспористого вольфрама. Исследование порошка вольфрама с присадками марки ВА, результаты которого приведены в работе [34], показывают (табл. 4), что насыпная плотность вольфрама с присадками марки ВА еще ниже, чем марки ВЧ и выше пористость штабиков даже при повышенных удельных давлениях прессования.

Таблица 3

Параметры порошка и условия прессования штабиков из вольфрама марки ВЧ [33]

Параметры порошка		Удельное давление прессования, МПа	Усилие прессования, кН	Длина штабика, мм	Средние размеры поперечного сечения штабиков, мм		Средняя плотность штабиков, г/см <sup>3</sup>
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Средний размер зерна, мкм				Высота	Ширина	
4,29	3,35	441,62	2815,3	503	13,27	12,67	12,125
		500,50	3190,7	503	13,03	12,66	12,320
4,55	4,10	382,73	2439,9	503	13,17	12,70	12,238
		441,62	2815,3	503	13,01	12,69	12,451
		500,50	3190,7	503	12,80	12,69	12,640
5,18	4,55	382,73	2439,9	503	12,94	12,67	12,527
		441,62	2815,3	503	12,72	12,66	12,738
		500,50	3190,7	503	12,51	12,66	12,922

Многочисленные попытки снижения пористости за счет увеличения удельного усилия прессования к успеху не привели, поскольку штабики при этом расслаиваются. В наибольшей мере брак штабиков по расслоям и трещинам проявляется на гетерогенных композициях с присадками наночастиц оксидов тория, лантана и иттрия (марки ВТ, ВЛ и ВИ) [35, 36]. Рассчитан новый способ получения безрасслоенных штабиков пониженной пористости из вольфрамовых порошков с наночастицами. Так в патенте на изобретение [37] в порошок вольфрама марки ВА с

кремнещелочной и алюминиевой присадками добавляется от 11 до 13 % по массе всего порошка наночастиц вольфрама размерами от 40 до 60 нм. Это позволяет при пониженных до 305–350 МПа удельных усилиях прессования получать безрасслоенные штабики повышенной до 13,4–13,5 г/см<sup>3</sup> плотности. А полученные из этих штабиков последующими операциями спекания и обработки давлением катоды и подогреватели электронных приборов имеют повышенную с 2900 до 3000 °С рабочую температуру.



Таблица 4

**Параметры порошка и условия прессования  
штабиков из вольфрама марки ВА [34]**

Параметры порошка		Удельное давление прессования, МПа	Усилие прессования, кН	Длина штабика, мм	Средние размеры поперечного сечения штабиков, мм		Средняя плотность штабиков, г/см <sup>3</sup>
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Средний размер зерна, мкм				Высота	Ширина	
2,24	4,90	313,4	1922,3	504	12,21	12,17	11,445
		451,1	2766,9	504	12,21	12,17	12,032
		569,8	3494,9	504	12,05	12,17	12,533
2,61	-	284,9	1747,5	504	12,25	12,17	11,271
		432,1	2652,2	504	12,19	12,17	12,034
		569,8	3494,9	504	12,05	12,17	12,646
2,83	4,68	308,6	1892,8	504	12,19	12,17	11,405
		432,1	2652,8	504	12,21	12,17	12,044
		569,8	3494,8	504	11,99	12,17	12,602

Известно, что второй причиной брака квадратных и прямоугольных штабиков с наночастицами оксидов Th, La и Y по расслоям и трещинам, кроме повышенных удельных усилий прессования, является неоднородное напряженное состояние дисперсноупрочненных прессовок, приводящее к появлению растягивающих напряжений и браку. Устранить растягивающие напряжения и снизить количество бракованных штабиков можно изменением схемы приложения усилий на штабик при прессовании. В патенте [38] изменение схемы приложения усилий достигается за счет изменения геометрической формы поперечного сечения штабика. На наклонные грани плоского штабика в виде неправильного шестигранника прикладываются нормальные сжимающие усилия, что приводит к уменьшению растягивающих напряжений в штабиках и снижению их брака.

Результаты экспериментальных исследований параметров порошков чистого вольфрама и порошковых композиций на основе вольфрама, а так же геометрических, кинематических и силовых условий формования использованы УзКЖТМ и заводом «Победит» для совершенствования технологии получения штабиков и качества готовых изделий.

### **Выводы**

1. Проведенный анализ процессов компактирования в пресс-формах порошков и порошковых композиций на основе углерода и вольфрама позволил установить, что углерод и вольфрам являются самыми тугоплавкими из всех известных элементов и отличаются уникальными химическими, физическими и механическими свойствами. Эти уникальные свойства углерода и

вольфрама способствовали их широкому промышленному использованию до настоящего времени и открыли еще более широкие возможности использования в XXI веке особенно в аэрокосмической и термоядерной технике.

2. Выявлены и проанализированы основные особенности компактирования в закрытых пресс-формах порошковых композиций на основе углерода. Эти особенности заключаются в следующем:

- по сравнению с виброкомпактированием и выдавливанием через мундштук прессование в пресс-формах позволяет получать изделия повышенной плотности и с улучшенными свойствами;
- все композиции на основе углерода отличаются высокой склонностью к адсорбции газов и паров жидкостей, что усложняет процесс компактирования и затрудняет получение повышенной плотности изделий;
- исходные порошки для углеродных композиций в виде коксов, природных и искусственных графитов отличаются крупнозернистостью, что повышает трудоемкость процесса получения порошков для композиций;
- порошки для углеродных композиций, особенно порошки коксов для электродов, также отличаются крупнозернистостью (средние размеры от 0,33 до 1,52 мм), что снижает объемную долю пластификатора;
- велика объемная доля пластификатора в углеродных композициях (пека и смолы от 14 до 20 % и более), превращение которого в графит или бакелит является длительной, трудоемкой и высокоэнергетической операцией;

– в большинстве процессов компактирования углеродную композицию или технологическую оснастку необходимо нагреть, т.е. в пресс-формах выполняется горячее прессование.

3. Выявлены и проанализированы основные особенности компактирования в разборных пресс-формах порошков и порошковых композиций на основе вольфрама. Эти особенности заключаются в следующем:

– уже более 100 лет прессование в разборных пресс-формах штабиков в мировой практике является широко применяемым способом получения заготовок для последующей их переработки на прутки, проволоку, полосы и ленты, а в последние годы и на слитки;

– разборные пресс-формы для свободного извлечения штабиков после компактирования должны образовывать полость матрицы с саморегулируемыми размерами;

– в качестве оборудования должны использоваться специализированные гидравлические прессы с горизонтальным и вертикальным плунжерами, причем скорости плунжеров должны находиться в пределах 2,0 – 2,5 мм/с и обеспечивать создание удельных давлений прессования от 200 до 650 МПа;

– порошки чистого вольфрама, вольфрама с присадками и дисперсноупрочненные композиции на основе вольфрама отличаются низкой насыпной плотностью, малыми средними размерами частиц и низкой плотностью штабиков.

#### Список литературы

1. Скороход, В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений / В.В. Скороход. – Киев: Техніка, 1982. – 168 с.
2. Савватимский, А.И. Плавление графита и жидкий углерод // Успехи физических наук, 2003, том 173, № 12. – С. 1371 – 1379.
3. Фиалков, А.С. Углеграфитовые материалы / А.С. Фиалков. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
4. Фиалков, А.С. Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов. – М.: Аспект Пресс, 2008. – 687 с.
5. Froes, F.H. Twenty first century aerospace materials // Порошковая металлургия, 1993, № 7. – С. 14-23.
6. Shedd, K. Tungsten Industry in USA / Tr. of 9<sup>th</sup> International Tungsten Symposium. – Pittsburg, USA, 2002. – P. 8-10.
7. Schubert W.D., Lassner E. Tungsten. – London: International Industry Association, 2009 (www.itia.info).
8. Темкин, И.В. Производство электроугольных изделий / И.В. Темкин. – М.: Высшая школа, 1975. – 232 с.
9. Сайт [www.brush.co.uk](http://www.brush.co.uk).
10. Материалы фирмы Mersen Group, France [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.mersen.com>].
11. Материалы фирмы Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Germany [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.schunk-group.com>].
12. Материалы Московского электродного завода [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.graphitel.ru>].
13. Материалы группы компаний «Энергопром» [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.energoprom.ru>].
14. Материалы Челябинского электродного завода [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.chez.ru>].
15. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А., Яров Б.А. Статическое и высокоэнергетическое формование углеродных порошковых композиций // Металлург, № 11, 2011. – С. 87-91.
16. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Эффективная технология получения токосъемников троллейбусов из углеродных композиций // Справочник, Инженерный журнал, № 5, 2012. – С. 20-25.
17. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Новые изделия, пресс-формы и технологии формования порошковых материалов на основе углерода // Вестник ЮУрГУ, серия Металлургия, № 39, 2012. – С. 94-99.
18. Чалых, Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е.Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
19. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауэр. – М.: Иностранная литература, 1948. – 768 с.
20. Полисар Е.Л., Тырин В.А., Зенов В.Е. и др. Об уплотнении коксо-пековых масс в пресс-форме // Сб. Конструкционные материалы на основе углерода. – М.: НИИграфит, 1975, вып. 10. – С. 14-20.
21. Материалы компании Occhio [Электронный ресурс]. – [URL: <http://www.advanced-coating.com>]
22. Yarov B.A. Etude physique et technologique de procede de Compactage a Grande Vitesse de poudres graphite / Diplome master. – France, Saint-Etienne, 2011 – 40 p.
23. Статическое и высокоэнергетическое формование углеродных порошковых композиций / Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А., Яров Б.А. // Металлург, 2011, №11. – С. 87-91.
24. Static and high-energy shaping of carbon-based power composites / Samodurova M.N., Barkov L.A., Ivanov V.A., Yarov B.A. // Metallurgist, 2012, T.55, № 11-12. – P. 848-853.
25. Новые изделия, пресс-формы и технологии формования порошковых материалов на основе углерода / Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия, 2012, № 39. – С. 94-99.
26. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Эффективная технология получения токосъемников троллейбусов из углеродных

композиций // Справочник. Инженерный журнал, 2012, № 5. – С. 20-25.

27. Smithells C.J. Tungsten. – London Chapman and Hall Ltd., 1952. – 414 p.

28. Проспект Tugsten Wire. – USA: General Electric. General Catalog 7215, 1983. – 16 p.

29. Оборудование для обработки давлением порошков и порошковых заготовок / Под. ред. Л.А. Баркова. – Челябинск: Металл, 1992. – 296 с.

30. А.с. 1694344 СССР. МКИ В22F 3/02. Пресс-форма для прессования порошков / М.Л. Ямпольский, Л.А. Барков, С.А. Мымрин и др. Заявлено 24.05.89. Оpubл. 30.11.1991. – Бюл. № 44.

31. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.

32. Барков Л.А., Мымрин С.А. Обработка давлением вольфрама и его сплавов. – Челябинск: ЧПИ, 1987. – 66 с.

33. Мымрин С.А., Кузнецов В.Э., Барков Л.А. Экспериментальное исследование процессов холодного прессования штабиков из порошков вольфрама // Кузнечно-штамповочное производство, 1990, № 9. – С. 15-18.

34. Барков Л.А., Мымрин С.А., Кузнецов В.Э. теоретические и экспериментальные исследования процесса холодного формования порошков / Сб. науч. трудов «Машины и технологии ОМД». – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С. 79-92.

35. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Способы и устройства для статического формования композиций из порошков со специальными свойствами // Технология металлов, № 8, 2012. – С. 46-55.

36. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А. Металлургия и технология порошкового вольфрама. Учебное пособие. – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. – 147 с.

37. Пат. 2361697 РФ. МПК В22F 3/12. Способ получения вольфрамовых заготовок / Л.А. Барков, С.А. Мымрин, Б.А. Чаплыгин. Заявлено 14.09.2007. Оpubл. 20.03.2009. Бюл. № 20.

38. Пат. 2373024 РФ. МПК В22F 3/02. Заготовка для изготовления полуфабрикатов из порошковых металлов / Л.А. Барков, С.А. Мымрин, В.Н. Дятлов. Заявлено 11.02.2008. Оpubл. 20.11.2009. Бюл. № 32.