



*Н.А. Бормосов, В.П. Белоусова, А.А. Втулкин
Вологодский государственный университет*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ФОРСУНОК С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Проанализированы конкурентные преимущества технологий порошковой металлургии по отношению к технологиям литья и обработки давлением. Представлены результаты проектирования конструкции пресс-формы и технологии изготовления изделий седьмой группы сложности – плоско-факельных распылителей (форсунок) с применением метода холодного прессования с последующим вакуумным спеканием. В результате экспериментальных исследований гидродинамических и теплообменных характеристик форсунок установлены оптимальные режимы распыления для обеспечения требуемых параметров диспергирования охлаждающей жидкости. Перспективность развития технологий порошковой металлургии базируется на их ресурсосберегающем потенциале, подтверждается быстрыми темпами роста в странах Западной Европы, США, Японии.

Технологии порошковой металлургии, плоско-факельные распылители, параметры диспергирования, эксплуатационные свойства.

В условиях инновационного пути развития экономики Российской Федерации производство металлических порошков и спеченных изделий из порошковых материалов – перспективная развивающаяся отрасль промышленного производства. В научном аспекте эта отрасль объединяет порошковую металлургию, покрытия из порошковых композиций и композиционные материалы. Фундаментальные науки – физика твердого тела, физическая и неорганическая химия – составили основу теоретической базы развития данных направлений.

Императивным признаком, отличающим металлургию порошковую от металлургии классической, безусловно, является отсутствие расплавления основного компонента шихты. Для распространенных составов шихты конструкционного назначения таким компонентом служит железо, имеющее температуру плавления 1539°C. Спекание же деталей на основе железо-углеродистой шихты производится при температуре 1260°C. Современные методы порошковой металлургии относятся к ресурсосберегающей технологии, так как при этом практически 100% металлов в виде порошков расходуется по прямому назначению. Среди применяющихся методов получения заготовок для деталей машин технологии порошковой металлургии зачастую имеют конкурентные преимущества по отношению к технологиям литья и обработки давлением. Технологии порошковой металлургии позволяют производить изделия и создавать принципиально новые материалы, получение которых в рамках традиционных технологий плавильной металлургии затруднено или невозможно [1]. Перспективность развития технологий порошковой металлургии подтверждается быстрыми темпами роста в странах Западной Европы, США, Японии.

Значимым с точки зрения обеспечения требуемых потребительских свойств продукции из порошковых материалов является выбор технологической схемы

производства. Здесь существенное влияние оказывает способ получения порошка, влияющий на форму частиц и, соответственно, на технологические свойства шихты – уплотняемость и прессуемость. При решении вопроса о переводе литых (компактных) деталей на изготовление методом порошковой металлургии учитывается серийность продукции, размеры, форма, масса и ряд других технологических, технических и производственных факторов. При изготовлении продукции общемашиностроительного применения из порошков по традиционной технологии, включающей такие этапы, как смешивание порошков, формование заготовки и последующее твердофазное или жидкофазное спекание в вакууме или защитной атмосфере, предъявляется и ряд дополнительных требований: высокий качество точности детали, высокая степень плотности материала.

При переводе деталей на изготовление методом порошковой металлургии обеспечивается возможность замены легированных сталей, цветных металлов и их сплавов на порошковые материалы, в частности на железо-графит и бронзо-графит, а применение электроконтактных композиций сокращает расход драгоценных металлов – серебра, иридия и платины. Практикой подтверждена перспективность перевода деталей на данные технологии и за счет сокращения операций производственного цикла в 2,0–2,5 раза, повышения производительности труда в металлообработке, что актуально в плане решения стратегических задач развития технологий. Преимущества порошковой металлургии проявляются и в снижении первоначальных инвестиционных вложений. Развитие технологий порошковой металлургии также способствует повышению ресурсной устойчивости металлургии плавильной [2].

Необходимо констатировать, что рост промышленного производства (автомобилестроения, электротехнической, станкостроительной и инструментальной

ной промышленности, сельскохозяйственного машиностроения) сегодня значительно опережает рост производства продукции в виде спеченных порошковых изделий. Представляется оправданным отметить, что практически около половины всего объема потребности в изделиях порошковой металлургии общемашиностроительного назначения составляют такие изделия, которые возможно переводить на данную технологию, не прибегая дополнительно к опытной доработке. При этом доля продукции, требующая практических испытаний и экспериментальных работ, составляет порядка 15–25%. Преимущественно методом порошковой металлургии производятся изделия крупносерийной программы выпуска массой от 80 до 1000 г простой и средней сложности.

В то же время анализ номенклатуры продукции, изготавливаемой широким спектром методов и технологий порошковой металлургии, позволяет констатировать ее разнообразие и конструктивную сложность, широкий диапазон изделий по назначению, форме, массе. Чем сложнее форма детали, тем существеннее проявляются экономические преимущества перевода деталей на данную технологию. При этом необходимо обратить внимание и на организацию участков по производству спеченных порошковых изделий и в условиях неспециализированных предприятий машиностроения. Тем самым обеспечивается база для развития инженерного бизнеса в условиях технологического взаимодействия металлургии и машиностроения с учетом приоритетов в развитии промышленного комплекса региона [3].

Повышение эксплуатационных свойств спеченных изделий обеспечивается как оптимизацией химического состава шихты, так и посредством освоения инновационных инженерных решений в области совершенствования важнейших операций технологического процесса порошковой металлургии – прессования и спекания. Занимаясь в течение ряда лет решением вопросов, связанных с технологиями, использующими диспергированные материалы, в рамках обозначенной проблемы, авторами работы накоплен определенный опыт разработки оригинальных конструкторских решений по проектированию пресс-форм для изготовления деталей седьмой (наивысшей) группы сложности.

В частности, к деталям наивысшей сложности относятся широкоугольные плоско-факельные форсунки щелевого типа. Они нашли широкое применение в практике непрерывной разливки металла. Форсунки данного типа позволяют обеспечить лучшее распределение воды по ширине крупных слябов. Также они удобны при установке на мощных машинах непрерывной разливки стали в узком межроликном пространстве. Значимы и вопросы рационального использования воды для охлаждения металла и элементов оборудования машин [1].

На рисунке 1 представлен чертеж плоско-факельного водяного распылителя (форсунки). Геометрия распылителя (форсунки): площадь выходного отверстия составляет $19,5 \text{ мм}^2$, фронтальный угол раскрытия факела в рабочем режиме – 140° , боковым углом – 3° .

Деталь относится к наивысшей (седьмой) группе сложности. Предназначена для зоны вторичного ох-

лаждения в машинах непрерывного литья заготовок, которая играет важную роль в процессе формирования структуры стальных заготовок. При модернизации системы вторичного охлаждения, конструкция которой в значительной мере определяет качество поверхности и внутреннюю структуру слитка, необходимы технические решения, позволяющие рационально организовать систему охлаждения.

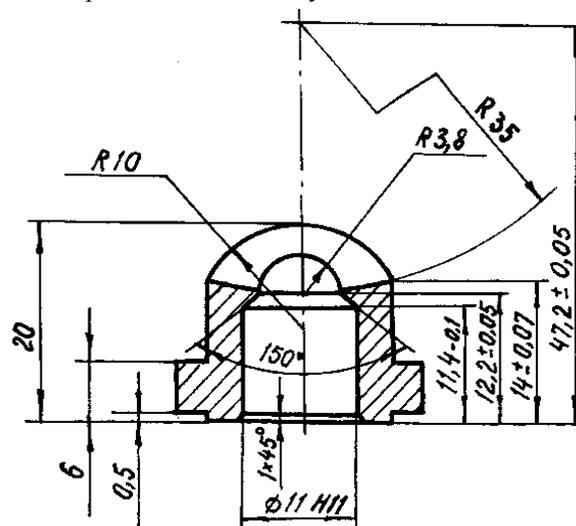


Рис. 1. Плоско-факельный водяной распылитель

Технология изготовления распылителей методом порошковой металлургии обеспечивает минимальный разброс характеристик сопел. Определенное сочетание режимных параметров технологических процессов подготовки шихты, холодного формования и вакуумного спекания позволяет получить высокую размерную стабильность сопел. Достигается снижение разброса гидродинамических характеристик в пределах крупных партий до $3\div 5\%$. Корпуса форсунок формируются в специальной пресс-форме за один ход рабочего органа пресса с минимальным количеством отходов порошкообразной шихты [1]. Использование композиционного железохромистого материала, получаемого методом механического легирования и спекания в вакууме, обеспечивает высокую стойкость форсунок к коррозионно-эрозионным воздействиям при повышенных температурах и в агрессивных средах. Применение в шихте жидкофазного заполнителя и калибровки обеспечивает достаточный уровень механических свойств, которые могут быть изменены в соответствии с конкретными условиями эксплуатации.

На конструкцию пресс-формы для изготовления плоско-факельной водяной форсунки получен патент. Изготовлена пресс-форма и опытные образцы форсунок. Установлено, что технология изготовления распылителей на основе типового метода порошковой металлургии обеспечивает стабильность геометрии сопла и минимальный диапазон разброса его характеристик.

Сравнительное исследование капельного спектра форсунки, изготовленной методом порошковой металлургии, и аналогичной форсунки фирмы LENCLEER (Германия), изготовленной механической обработкой, показало, что качество диспергирования жидкости разработанных сопел вполне соответствует необходимым требованиям (рис. 2).

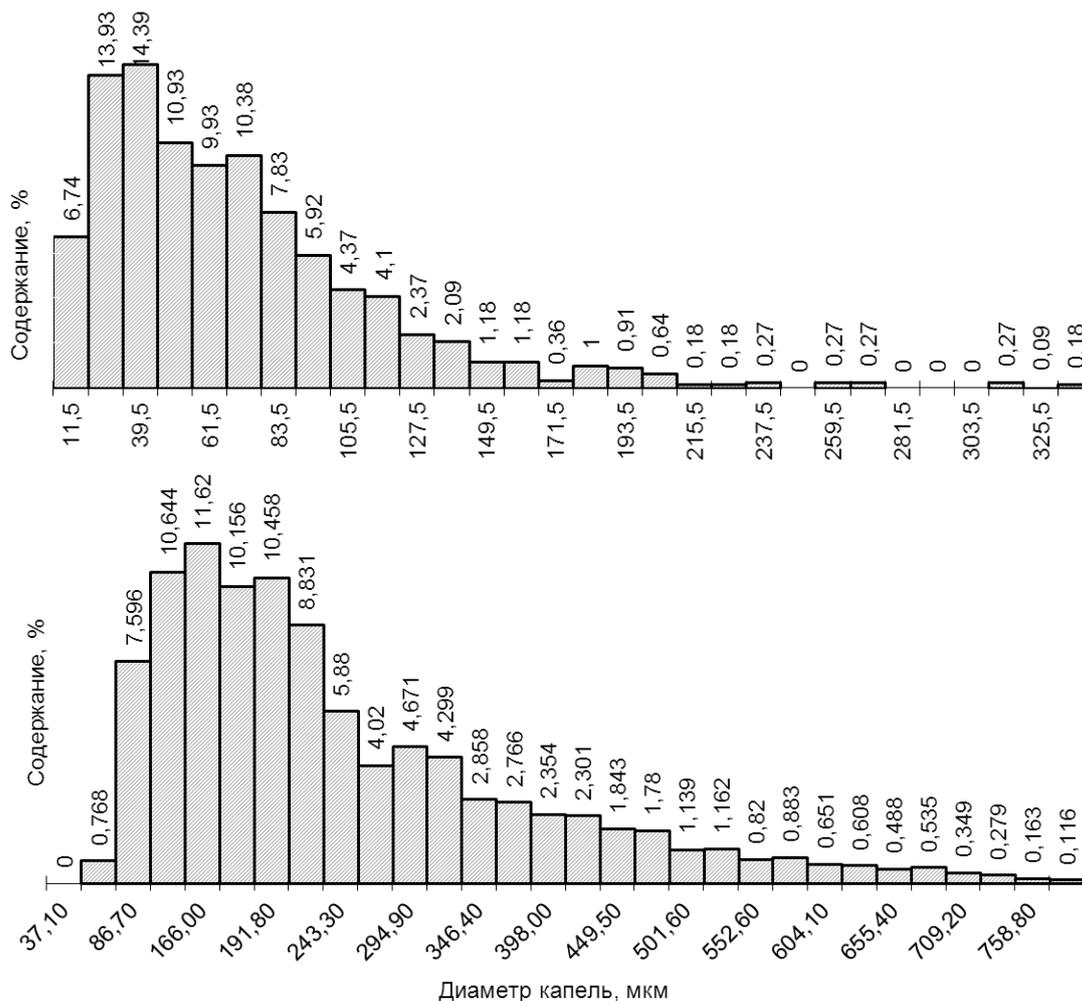


Рис. 2. Распределение капель по размерам:
 а) форсунка фирмы LECHLER (водовоздушное охлаждение); б) форсунка ВоГУ, изготовленная методом порошковой металлургии (водяное охлаждение)

Таблица

Расчет плоскофакельной форсунки

№	Параметр	Давление воды в системе, МПа				
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
1	2	3	4	5	6	7
1	Расход воды, $\times 10^{-4}, \text{ м}^3/\text{сек}$	1,25	1,45	1,74	1,95	2,18
2	Площадь выходного отверстия форсунки, $\times 10^{-5} \text{ м}^2$	1,95				
3	Средний объем диспергированной капли, $\times 10^{-9} \text{ м}^3$ при высоте установки форсунки от охлаждаемой поверхности:					
	- 0,25 м	0,90	0,62	0,46	0,41	0,31
	- 0,35 м	0,48	0,39	0,21	0,19	0,15
4	Квадрат среднеповерхностного размера диспергированной капли (R_{02}^2), $\times 10^{-6} \text{ м}^2$:					
	- 0,25 м	0,46	0,37	0,32	0,29	0,23
	- 0,35 м	0,29	0,21	0,17	0,15	0,12
5	Расчетная концентрация капель, $\times 10^6 \text{ л}/\text{м}^3$:					
	- 0,25 м	0,700	0,835	1,016	1,130	1,200
	- 0,35 м	0,420	0,450	0,800	0,870	1,110
6	Средняя скорость движения капли в потоке, $\text{м}/\text{сек}$:					
	- 0,25 м	3,80	4,40	5,30	5,93	6,64
	- 0,35 м	4,40	5,10	6,10	6,84	7,66
	- 0,45 м	4,80	5,55	6,71	7,53	8,43

1	2	3	4	5	6	7
7	Угол раскрытия факела, град					
	фронтальный γ	130	137	140	140	140
	боковой β	3	3	3	3	3
8	Площадь орошения, м ²					
	- 0,25 м	0,053	0,063	0,070	0,070	0,070
	- 0,35 м	0,140	0,160	0,170	0,170	0,170
	- 0,45 м	0,240	0,027	0,300	0,300	0,300
9	Плотность орошения, $\times 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{сек})$:					
	- 0,25 м	2,35	2,28	2,48	2,76	3,11
	- 0,35 м	0,89	0,91	1,02	1,13	1,28
	- 0,45 м	0,52	0,54	0,58	0,64	0,73
10	Коэффициент теплоотдачи форсунки, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$:					
	- 0,25 м	636	707	896	1010	1210
	- 0,35 м	279	250	431	464	663
	- 0,45 м	194	237	280	310	384

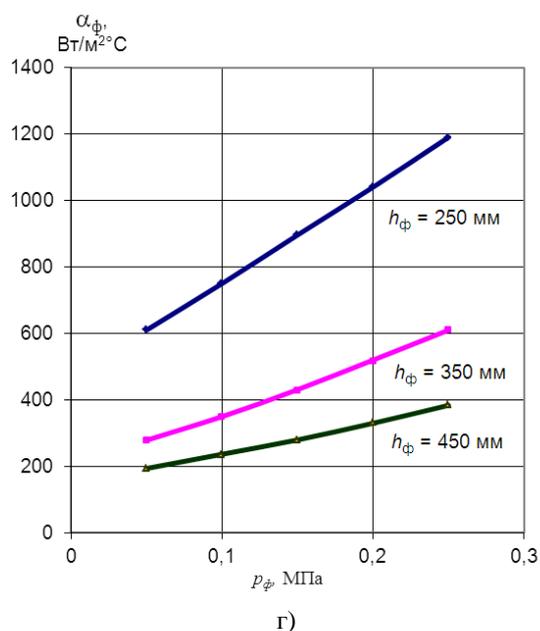
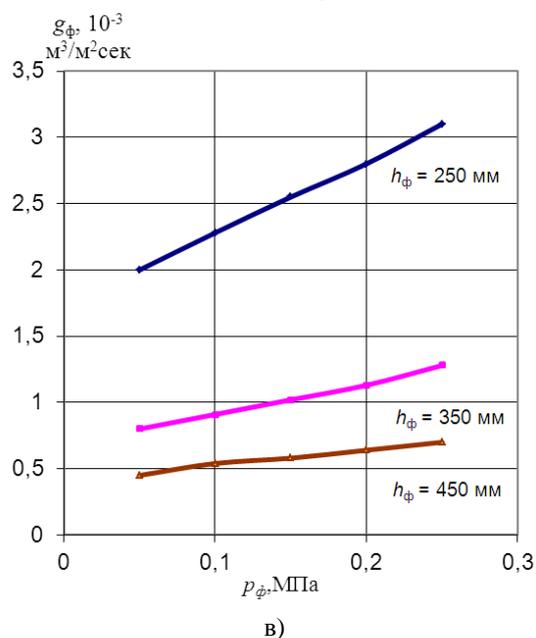
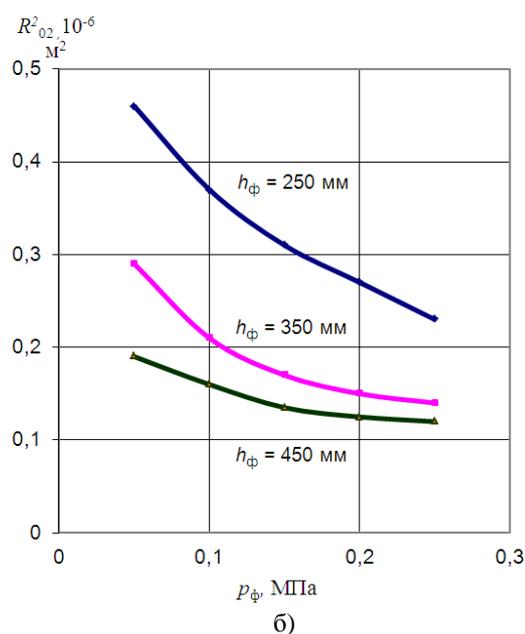
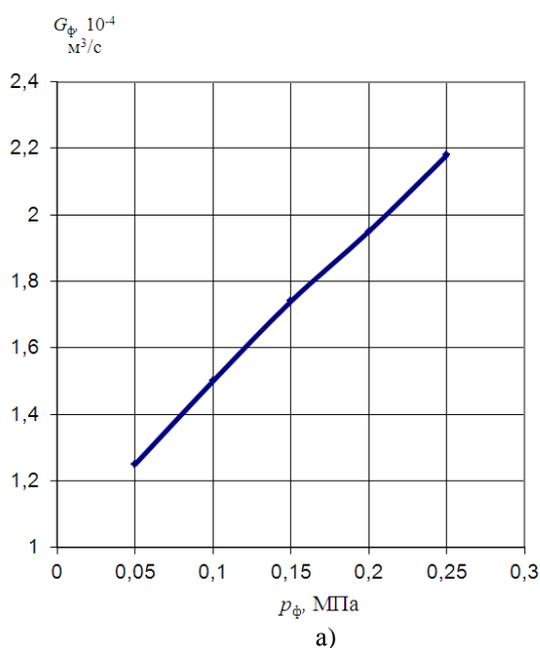


Рис. 3. Экспериментальные зависимости работы форсунки: а) расхода жидкости $G_{\text{ф}}$ от давления перед форсункой $P_{\text{ф}}$; б) квадрата среднеповерхностного радиуса диспергированной капли (тонина распыла) R^2_{02} от давления перед форсункой $P_{\text{ф}}$; в) плотности орошения факела $g_{\text{ф}}$ от давления перед форсункой $P_{\text{ф}}$; г) коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ф}}$ от давления перед форсункой $P_{\text{ф}}$. $h_{\text{ф}}$ – высота установки форсунки

Исследования гидродинамических и теплообменных характеристик низконапорной плоско-факельной форсунки, изготовленной в лаборатории ВоГУ методом порошковой металлургии, проводились на экспериментальном стенде по разработанной методике [4, 5]. Результаты исследований приведены в таблице. На рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости, характеризующие основные технологические параметры работы плоскофакельной форсунки.

На рисунке 3а изображена экспериментальная зависимость объемного расхода воды через форсунку от давления воды перед отверстием форсунки. В небольшом диапазоне давлений эта зависимость примерно линейная.

На рисунке 3б показана зависимость квадрата среднего радиуса, характеризующего среднюю площадь поверхности капель, от давления на разной высоте от форсунки. Средняя площадь поверхности капель с ростом давления уменьшается, стремясь к асимптотическому пределу, причем этот предел не зависит от расстояния до форсунки.

На рисунке 3в показана зависимость изменения плотности орошения факела форсунки от давления на различной высоте.

На рисунке 3г показана зависимость среднего расчетного коэффициента теплоотдачи от давления на различной высоте от форсунки. С ростом давления коэффициент теплоотдачи возрастает, причем, чем меньше высота, тем сильнее зависимость коэффициента от давления. При большей высоте, при одинаковом давлении коэффициент теплоотдачи меньше. Эту зависимость в небольшом диапазоне давлений также можно считать примерно линейной.

Реализация предлагаемой разработки по изготовлению плоско-факельных распылителей методом порошковой металлургии кроме обеспечения высоких эксплуатационных свойств данной продукции имеет и значимую экологическую составляющую, в частности: из технологического процесса исключены экологически опасные процессы сталеплавильного производства и обработки металлов резанием; имеет место безотходная консолидация порошковой шихты в изделие при прессовании и спекании; в технологическом процессе не используются смазочно-охлаждающие технологические среды [6].

Разработана конструкция пресс-формы для изготовления методом порошковой металлургии изделий наивысшей сложности – плоско-факельных распылителей водной среды для зоны вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок. Пресс-форма адаптирована к быстрой переналадке для изготовления форсунок с требуемыми геометрическими параметрами факела. Конструкция пресс-формы признана изобретением. Важным преимуществом предложенной технологии изготовления форсунок является возможность обеспечения оптимизации гидродинамических и теплообменных характеристик, влияющих на качество диспергирования жидкости.

Литература

1. Шичков, А. Н. Управление вторичным охлаждением машин непрерывного литья стали / А. Н. Шичков, Н. А. Бормосов, В. П. Белоусова. – DOI: 10.18721/JEST.240209 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 104–118.
2. Белоусов, А. Л. Повышение ресурсной устойчивости развития металлургического комплекса / А. Л. Белоусов, В. П. Белоусова, М. М. Андропова // Региональная экономика: теория и практика. – 2008. – № 15 (72). – С. 52–55.
3. Белоусов, А. Л. Вопросы развития промышленного комплекса в аспекте реализации специальных инвестиционных контрактов А. Л. Белоусов // Управление пространственным развитием территорий: глобальные тренды и региональные приоритеты : материалы научно-практической конференции. – 2019. – С. 138–140.
4. Калягин, Ю. А. Тепловые процессы в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок: монография / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. В. Лукин. – Череповец : ЧГУ, 2005. – 168 с.
5. Экспериментальный стенд и методика исследования форсунок при охлаждении металла в МНЛЗ / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, А. М. Ламухин [и др.] // Сталь. – 2003. – № 6. – С. 20–23.
6. Белоусова, В. П. Инженерные и экономические вопросы экологии : учебное пособие / В. П. Белоусова, А. Л. Белоусов. – Вологда : ВоГТУ, 2008. – 108 с.

N.A. Bormosov, V.P. Belousova, A.A. Vtulkin

PRODUCTION AND TESTING OF SPRAY NOZZLES WITH HIGH PERFORMANCE PROPERTIES

The competitive advantages of the powder metallurgy technologies over the technology of casting and pressure shaping have been analyzed. The results of the press die design and the technology of production of the items of the seventh complexity group – flat flare sprayers (sprayer nozzles) with the use of cold pressure method with further vacuum sintering have been presented. The experimental research of hydrodynamic and heat transfer characteristics of spray nozzles resulted in defining of the optimum regimes of spraying to ensure the required parameters of coolant fluid dispersion. Exploitability of the development of the powder metallurgy technologies are based on their resources-saving potential and are proved by high growth rates in the countries of Western Europe, the USA, Japan.

Powder metallurgy technologies, flat flare sprayers, dispersion parameters, performance properties.