

УДК 621.74.046

**В. А. Слюсарев**, аспирант, e-mail: a0509162132@gmail.com

**П. Б. Калюжный**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: kpb.cmw@ukr.net

**И. А. Шалевская**, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр.  
e-mail: into66@ukr.net

**А. В. Шалевский**, гл. технолог

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ С МАКРОАРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*В статье приведена схема и рассмотрены особенности процесса изготовления пенополистироловых моделей с макроармирующей фазой автоклавным методом. Исследование процесса спекания армированных моделей в автоклаве показало, что с увеличением толщины и массы арматуры продолжительность спекания модели увеличивается.*

**Ключевые слова:** пенополистироловая модель, армирующая фаза, пресс-форма, автоклав, спекание, плотность.

*У статті наведено схему та розглянуто особливості процесу виготовлення пінополістиролових моделей з макроармуючою фазою автоклавним методом. Дослідження процесу спікання армованих моделей в автоклаві показало, що зі збільшенням товщини і маси арматури тривалість спікання моделі збільшується.*

**Ключові слова:** пінополістиролова модель, армуюча фаза, прес-форма, автоклав, спікання, щільність.

*In the article the scheme and features of process of manufacturing of foam polystyrene models with macro-reinforcing phase by an autoclave method are given. Investigation of the sintering process of reinforced models in an autoclave showed that with increasing thickness and weight of the reinforcement, the sintering time of the model increases.*

**Keywords:** expanded polystyrene model, reinforcing phase, die-mold, autoclave, sintering, density.

#### Введение

Метод литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) обладает рядом прерогатив для получения литых армированных отливок из железоуглеродистых сплавов по сравнению с другими способами литья [1]. При ЛГМ упрочнение жидкого металла достигается непосредственно в литейной форме армирующими макроэлементами, размещенными в пенополистироловой модели.

Важным этапом ЛГМ-процесса является получение пенополистироловой модели. Наиболее часто для опытного и мелкосерийного производства применяется автоклавный способ, который подразумевает заполнение пресс-формы гранулами полистирола, спекание модели в автоклаве и охлаждение пресс-формы с моделью. Один из вариантов армирования по ЛГМ-процессу предполагает получение модели с армирующими элементами путем спекания. Для этого армирующие элементы (стержни, пластины, волокна) устанавливаются в пресс-форму до задувки ее гранулами полистирола. В таком варианте арматура будет влиять на теплообмен в пресс-форме и термовременные параметры спекания гранул полистирола.

*Постановка задачи.* Цель работы – определение влияния армирующей фазы на процесс спекания пенополистироловых моделей автоклавным способом.

*Особенности изготовления моделей с арматурой.* Качество литейных пенополистироловых моделей, которые изготавливаются автоклавным способом, обычно определяется основными характеристиками: плотностью, размерной точностью, механической прочностью, шероховатостью поверхности и сплошностью модели. В случае наличия армирующих элементов в модели к вышеуказанным характеристикам следует добавить правильность расположения арматуры в модели, то есть отсутствие ее перекосов и смещений.

Цикл изготовления пенополистироловых моделей с армирующими элементами автоклавным методом можно представить в виде схемы (рис. 1). От традиционного процесса изготовления моделей [2, 3] данный цикл отличается наличием этапа установки армирующих элементов в пресс-форму. Каждый из восьми этапов характеризуется определенной продолжительностью  $\tau_1 - \tau_8$ .



Рис. 1. Цикл изготовления пенополистироловых моделей с армирующими элементами

Первый этап, установка арматуры в пресс-форму, является одним из важных, поскольку должен обеспечить необходимое положение арматуры в модели. С этой целью необходимо предусматривать выступающие части арматуры или пресс-форм, которые не позволяют смещаться армирующим элементам во время задувки пресс-формы гранулами полистирола, при транспортировании пресс-формы в автоклав и во время спекания модели.

Поскольку спекание пенополистироловой модели происходит под воздействием водяного пара, а охлаждение пресс-формы – в воде, то размещенные в модели армирующие вставки будут подвергаться действию коррозии. Для армирования чугунных отливок чаще всего применяется арматура из малоуглеродистой стали. С целью предупреждения коррозии армирующие элементы из стали необходимо использовать с защитным покрытием (оцинкованные, омедненные или луженые).

Сборка пресс-форм с арматурой производится, как и при традиционной тех-

нологии. Заполнение пресс-формы гранулами полистирола производится путем их эжектирования. В отличие от традиционной технологии присутствие арматуры усложняет процесс задувки пресс-формы. На данном этапе важно качество задувки, поскольку в тонких частях модели арматура может образовать зоны, которые плохо заполняются гранулами, что, в конечном итоге, приводит к дефектам модели в виде несплошностей.

Наиболее продолжительными операциями изготовления моделей автоклавным способом являются операции спекания модели  $\tau_5$  и охлаждения пресс-формы  $\tau_7$  [2]. Процесс спекания модели происходит следующим образом: за счет пара гранулы полистирола нагреваются, затем при температуре 80 °С оболочки гранул размягчаются и под действием изопентана расширяются, заполняя пустоты; при достижении температуры 100–110 °С гранулы спекаются между собой в монолитную массу, образуя таким образом модель.

На практике режим спекания моделей обычно подбирают опытным путем. При этом руководствуются, чтобы гранулы модели хорошо спеклись, то есть имели прочную связь. Основными параметрами, которыми управляют при изготовлении моделей автоклавным способом, являются время спекания и давление в камере автоклава. Увеличение времени спекания и повышение давления пара в автоклаве до определенных значений ведет к повышению прочности модели [4]. Оптимальным является время, при котором основной объем гранул модели спекся, и не успели образоваться «перепаленные» гранулы от излишнего тепла. Процесс спекания также зависит от плотности гранул полистирола, толщины модели [5] и времени вылеживания гранул [6].

Из работы [5] известно, что плотность гранул оказывает сильное влияние на процесс спекания. С увеличением плотности гранул в них труднее проникает теплоноситель из автоклава, поэтому замедляется процесс спекания гранул, особенно в центральной части модели. Увеличение давления пара в автоклаве интенсифицирует теплообменные процессы и, как результат, сокращается время спекания модели. Не менее значительное влияние на процесс спекания модели оказывает толщина модели. Из-за низкого коэффициента теплопроводности полистирола скорость роста температуры в центре модели обратно пропорциональна толщине модели.

Математические зависимости, представленные в работе [5], позволяют прогнозировать время спекания и охлаждения пенополистироловой модели при традиционном процессе ЛГМ. В случае присутствия армирующих вставок в пресс-форме изменяются условия теплообмена, ввиду чего указанные формулы для определения времени спекания и охлаждения модели нельзя использовать.

С точки зрения теории армирования отливок [7] параметрами, определяющими свойства армированного изделия, являются объемная доля арматуры, толщина (диаметр) арматуры и соотношение толщины арматуры и стенки отливки. Данные факторы также будут влиять и на процесс спекания и охлаждения моделей с армирующими элементами, поэтому их учитывали при выборе независимых факторов.

*Материалы и методы.* Для исследования влияния армирующих элементов на процесс спекания изготавливали модели цилиндрического сосуда высокого давления из полистирола марки D833 (фракция исходных гранул 0,3–1,5 мм, после предварительного вспенивания – 1,0–1,5 мм). Предварительное вспенивание полистирола производили в ванне под действием водяного пара. Модели получали в пресс-формах, выполненных из алюминиевого сплава марки 5083 ДСТУ ISO 209-1-2002, путем спекания в автоклаве ГК-100 при давлении пара в камере 0,16 МПа.

Армирующие элементы изготавливали из оцинкованной стальной проволоки толщиной 2,0, 1,2, и 0,9 мм в виде пружин, которые закладывались в пресс-форму в количестве одна или две штуки. Кроме этого была изготовлена арматура в виде цилиндра из стальной сетки толщиной 0,8 и размером ячейки 12x12 мм.

Для измерения массы арматуры и моделей использовали электронные весы с дискретностью 0,01 г, для хронометража времени спекания – секундомер.

## Проблемы технологии формы

Исследование процесса спекания моделей проводили при одной плотности полистирола (равной  $29 \text{ кг/м}^3$ ) и одном и том же давлении в автоклаве (0,16 МПа). Были изготовлены модели двух типоразмеров: объемом  $97 \text{ см}^3$  с толщиной стенки 8 мм и объемом  $108 \text{ см}^3$  с толщиной стенки 5 мм.

**Результаты и обсуждение.** В качестве контрольных опытов первоначально изготавливали модели без арматуры и фиксировали время их спекания. Продолжительность спекания моделей с арматурой определяли опытным путем. Для чего, отталкиваясь от времени контрольных опытов, постепенно увеличивали продолжительность выдержки пресс-формы с полистиролом и арматурой в автоклаве, пока не получали модель с качественной наружной и внутренней поверхностью. Для каждого вида арматуры и типа модели было изготовлено по три образца (для усреднения данных). На рис. 2 показаны полученные модели с арматурой, в которых часть пенополистирола вырезана для наглядности. Результаты измерений времени спекания моделей, а также исходные и расчетные данные приведены в таблице.

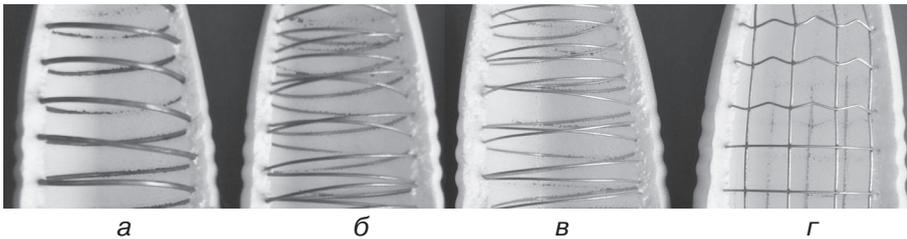


Рис. 2. Модели с арматурой: проволока толщиной 2 (а), 1,2 (б), 0,9 мм (в), сетка толщиной 0,8 мм (г)

### Данные по спеканию пенополистироловых моделей с арматурой

Толщина стенки модели, мм	Толщина арматуры, мм	Соотношение толщин арматуры и стенки	Масса арматуры, г	Объем модели, $\text{см}^3$	Объемная доля арматуры, %	Время спекания модели, с
5	-	-	-	108	-	335
5	0,8	0,16	9,4	108	1,12	345
5	0,9	0,18	10,5	108	1,25	350
5	1,2	0,24	19,6	108	2,33	355
5	2	0,4	28,2	108	3,35	365
8	-	-	-	97	-	260
8	0,8	0,1	4,5	97	0,59	285
8	0,9	0,113	4,8	97	0,63	290
8	1,2	0,15	8,8	97	1,16	300
8	2	0,25	12,7	97	1,68	320

Контрольные опыты показали, что продолжительность спекания моделей без арматуры с толщиной стенки 5 мм больше, чем моделей с толщиной стенки 8 мм. Это объясняется тем, что пресс-форма первой модели имела толще стенки, чем пресс-форма второй.

Для наглядности влияние толщины (диаметра) и массы арматуры на продолжительность спекания моделей представлено на рис. 3. Как видно из рис. 3, а, с увеличением диаметра арматуры продолжительность спекания модели возрастает. При этом время спекания модели со стенкой 5 мм с арматурой 0,9 мм увеличилось на 15 с от контрольного опыта, а с арматурой 2 мм – на 30 с. Для второй модели арматура

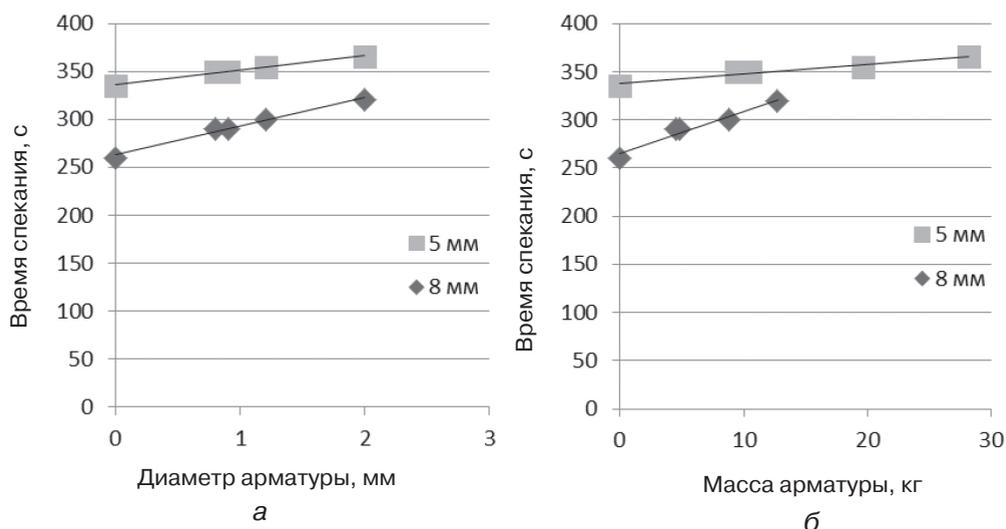


Рис. 3. Время спекания моделей с арматурой в зависимости от диаметра (а) и массы арматуры (б)

0,9 мм привела к увеличению времени спекания на 30 с, а арматура 2 мм – на 60 с. Линия тренда, проведенная через экспериментальные точки, свидетельствует о линейной зависимости продолжительности спекания от диаметра арматуры.

Увеличение массы арматуры (рис. 3, б) приводит к увеличению продолжительности спекания модели. Очевидно, что с увеличением массы арматуры количество тепла, расходуемое на нагрев арматуры до температуры спекания гранул полистирола, возрастает, то есть увеличивается общая теплоемкость пресс-формы. Следует отметить, что для модели с более массивной пресс-формой, хоть и содержащей арматуру большей массы, время спекания увеличилось не так значительно, как для второй модели. Это говорит о том, что на процесс спекания моделей с арматурой (и без нее) значительное влияние оказывает толщина стенки пресс-формы.

При спекании модели прогрев арматуры и гранул полистирола происходит частично за счет теплопроводности от стенок пресс-формы, а частично за счет конвективного тепла пара, попадающего в полость пресс-формы через венты. Поскольку интенсивность теплообмена между арматурой и стенками пресс-формы зависит от теплофизических свойств пенополистирола, который обладает низким коэффициентом теплопроводности, то прогрев арматуры не может происходить мгновенно.

Объемная доля арматуры и соотношение диаметра арматуры и толщины стенки модели имеют аналогичное массе влияние на продолжительность спекания. Прямопропорциональная зависимость времени спекания от объемной доли арматуры и ее массы объясняется тем, что процесс спекания модели замедляется ввиду того, что дополнительное количество тепла расходуется на нагрев арматуры. Такое же влияние на спекание модели имеет и диаметр арматуры, что связано не только с увеличением массы арматуры (или ее объемной доли). Поскольку интенсивность нагрева тела, в нашем случае армирующего элемента, определяется площадью поверхности теплообмена, то при одной и той же массе быстрее будет нагреваться арматура меньшего диаметра, которая в общей сложности имеет большую площадь поверхности.

Следует также отметить, что пенополистироловые модели с арматурой при одинаковой плотности полистирола имеют выше жесткость, чем неармированные модели. Армирующие элементы позволяют изготавливать более сложные модели отливок без опасения их деформации, а также получать армированные модели из полистирола с меньшей плотностью.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что продолжительность изготовления пенополистироловых моделей с армирующими элементами автоклавным методом увеличивается в сравнение с традиционной технологией ЛГМ в 1,15–1,45 раза. Это связано с установкой арматуры в пресс-форму и увеличением продолжительности этапов спекания и охлаждения модели.

Установлено, что увеличение толщины арматуры и ее массы приводит к пропорциональному увеличению продолжительности спекания модели в 1,05–1,25 раза, что обусловлено дополнительными затратами тепла на нагрев арматуры.



### Список литературы

1. Калюжный П. Б., Слюсарев В. А., Калашник Д. О. Армвання виливків за технологією лиття за моделями, що газифікуються // Металознавство та обробка металів. – 2017. – №4. – С. 48–53.
2. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
3. Литье по газифицируемым моделям. Основы теории и технологии. /Под ред. Ю. А. Степанова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
4. Pacyniak T., Buczkowska K., Kaczorowski R. Influence of time and pressure of forming a pattern on mechanical properties // Archives of Foundry Engineering. – 2011. – Vol. 11, Iss. 3. – pp. 151–156.
5. Шинский О. И., Киореан Х., Шинский И. О. Исследование термовременных параметров получения изделий из пенополистирола для литья по газифицируемым моделям // Процессы литья. – 1996. – №2. – С. 82–90.
6. Buczkowska K., Pacyniak T. The aging time effects of the pre-expanded polystyrene on the patterns mechanical properties // Archives of Foundry Engineering. – 2015. – Vol. 15, Iss. 1. – pp. 131–137.
7. Смеляков Н. Н. Армированные отливки. – М.: Машгиз, 1958. – 166 с.



### References

1. Kaliuzhnyi, P. B., Sliusarev, V. A., Kalashnyk, D. O. (2017). Armuvannia vylivkiv za tekhnolohiieiu lyttia za modeliamy, scho hazyfikuiut'sia [Casting reinforcement by lost-foam casting technology]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, Vol. 4, 48–53 [in Ukrainian].
2. Shuljak, V. S. (2007). Lit'e po gazificiruemyh modeljam [Lost-foam casting]. St. Petersburg: NPO «Professional» [in Russian].
3. Stepanov, Ju. A. (Ed.). (1976). Lit'e po gazificiruemyh modeljam. Osnovy teorii i tehnologii [Lost-foam casting. Fundamentals of theory and technology]. Moscow: Mashstroenie [in Russian].
4. Pacyniak, T., Buczkowska, K., Kaczorowski, R. (2011). Influence of time and pressure of forming a pattern on mechanical properties. Archives of Foundry Engineering, Vol 11 (3), 151–156. [in Russian].
5. Shinskij, O. I., Kiorean, H., Shinskij, I. O. (1996). Issledovanie termovremennyh parametrov poluchenija izdelij iz penopolistirola dlja lit'ja po gazificiruemyh modeljam [Investigation of the thermo-current parameters for the obtaining of products from expanded polystyrene for lost-foam casting]. Processy lit'ja, Vol. 2, 82–90 [in Russian].
6. Buczkowska, K., Pacyniak, T. (2015). The aging time effects of the pre-expanded polystyrene on the patterns mechanical properties. Archives of Foundry Engineering, Vol. 15 (1) pp. 131–137. [in Russian].
7. Smeljakov, N.N. (1958). Armirovannye otlivki [Reinforced castings]. Moscow: Mashgiz, p. 166 [in Russian].

Поступила 21.06.2018