



УДК 621.74:658.2

Поступила 13.10.2017

## ЭКОНОМИКА, ЭКОЛОГИЯ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

## ECONOMY, ECOLOGY, ORGANIZATION OF FOUNDRY PRODUCTION BY LOST FOAM CASTING

*О. И. ШИНСКИЙ*, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, пр. Вернадского, 34/1. E-mail: aluprt@mail.ru,

*Е. И. МАРУКОВИЧ*, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Б.-Бирюли, 11. E-mail: maruko46@mail.ru,

*И. А. ШАЛЕВСКАЯ, В. О. ШИНСКИЙ, С. И. КЛИМЕНКО*, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, пр. Вернадского, 34/1. E-mail: info66@mail.ru

*O. I. SHINSKY*, Physico-technological Institute of metals and alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail: aluprt@mail.ru,

*E. I. MARUKOVICH*, Institute of technology of metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, B.-Birulya str. E-mail: maruko46@mail.ru,

*I. A. SHALEVSKAJA, V. O. SHINSKY, S. I. KLIMENKO*, Physico-technological Institute of metals and alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail: info66@mail.

*Рассмотрен процесс получения отливок методом литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) с точки зрения экономической эффективности и возможностей получения высокоточных отливок высокого качества с прогнозируемыми свойствами. Приведены показатели выброса вредных веществ при ЛГМ, разработаны мероприятия по их обезвреживанию и показана экологическая безопасность процесса.*

*The process of receipt of castings by Lost Foam Casting Process (LFCP) from the point of view of economic efficiency and possibilities of receipt of the high-fidelity and high quality castings with the forecast properties. Indexes of hazardous substances emissions at LFCP are defined, measures to purify are worked out and ecological safety of process is shown.*

**Ключевые слова.** Литье по газифицируемым моделям, пенополистирол, выбросы вредных веществ, системы экологической защиты, себестоимость, металлоемкость, экономическая эффективность.

**Keywords.** Lost foam casting, expanded polystyrene, emissions of harmful substances, environmental protection systems, net cost, metal consumption, economic efficiency.

Литейное производство было и остается базой для машиностроения, авиастроения, энергетической отрасли, коммунального хозяйства и других отраслей народного хозяйства. В связи с увеличением требований к материалам и качеству литья, необходимостью быстрой переналадки производства, возможностью использования компьютерных технологий, 3D-проектирования на стадии разработки технологии и оснастки, использования станков с ЧПУ для изготовления оснастки или крупногабаритных моделей увеличивается интерес к технологии изготовления отливок методом литья по газифицируемым моделям (ЛГМ). При этом необходимо отметить, что на современном этапе развития литейного производства и экономики в целом снизилась потребность в массовом производстве и увеличился спрос на мелкие и средние серии отливок с повышенной размерно-весовой точностью. Развитие литейного производства сопровождается созданием самостоятельных не крупных цехов с гибкими технологиями получения отливок высокой точности и сложности, при этом метод литья по газифицируемым моделям оказался наиболее подходящим вместо литья в песчано-глинистые формы, по выплавляемым моделям, в металлические формы или других способов.

Суть технологии литья по газифицируемым моделям принципиально отличается от известных в мировой литейной практике [1, 2], так как только при реализации этого метода литейная модель находится

в форме во время ее заполнения расплавом металла. Собственно форма упрочняется до предельного уплотнения формовочного материала (ФМ) без связующего (кварцевый, цирконовый, металлический песок) за счет его виброуплотнения и создания разрежения в его поровом пространстве. Последнее позволяет за счет перепада давления между атмосферным и разрежением в форме доуплотнять ФМ.

По технологии ЛГМ модели изготавливают из пенополистирола (реже из других пенопластов) и помещают в формы из сухого песка без связующего. При этом модель замещается жидким металлом, который впоследствии кристаллизуется и затвердевает в вакуумируемой форме из несвязанного кварцевого песка. Вакуумирование кварцевого песка перед заливкой, в период заливки и кристаллизации металла обеспечивает прочность формы за счет перепада давления между атмосферным и внутриформенным, которое равно 0,05–0,09 МПа [3]. Кроме того, вакуумирование формы обеспечивает эвакуацию образовавшихся газов за пределы формы (контейнера) через вакуумпровод.

За время существования метода ЛГМ проведены широкомасштабные исследования гидрогазодинамики, теплообменных процессов, структурообразования и формирования физико-механических и эксплуатационных характеристик литых конструкций из железоуглеродистых и цветных сплавов при взаимодействии жидкого, затвердевающего сплава с продуктами термодеструкции, которые образуются в период испарения находящейся непосредственно в форме пеномодели под действием теплового потока заливаемого металла в форму.

На основании полученных знаний и установленных закономерностей созданы теоретические и технологические основы литья по газифицируемым моделям в вакуумируемые формы как минимум в десяти различных модификациях, включая получение моно- и армированных отливок [4], литых конструкций с дифференциальными свойствами из железоуглеродистых, цветных сплавов с использованием гравитационной заливки металла и под высоким регулируемым давлением. Также созданные во ФТИМС НАН Украины разновидности методов литья различаются и по способу применения моновысокопористых пенополистироловых моделей, а также моделей, наполненных макро-, микроармирующей фазой и модифицирующими, легирующими компонентами.

Базовый технологический процесс получения отливок по газифицируемым моделям гравитационной заливкой [5] включает в себя выплавку стали, чугуна, медных и алюминиевых сплавов в электрических дуговых и индукционных печах, а также в печах сопротивления при выполнении следующих технологических операций:

- подготовка и транспортировка шихтовых материалов и ферросплавов к плавильным печам;
- выплавка металла требуемого химического состава в электрических плавильных печах;
- предварительный нагрев заливочных ковшей с использованием плазменной установки;
- заливка металла с монорельса механизированными ковшами в вакуумируемые формы на заливочном стенде автоматизированной формовочно-заливочной линии;
- охлаждение отливок в формах на охлаждающей ветви автоматизированной формовочно-заливочной линии;
- удаление формовочного материала и отливок из контейнера на стенде автоматизированной формовочно-заливочной линии;
- транспортировка формовочного материала с помощью вакуумпескопровода в вакуумируемый промежуточный и раздаточный силосы автоматизированной формовочно-заливочной линии;
- регенерация формовочного материала в установках терморегенерации песка;
- охлаждение формовочного материала в холодильниках песка;
- обезвреживание выделяющихся при термическом разложении пенополистирола газов в установках термокаталитического дожигания газов;
- транспортировка отливок и модельных блоков в специальную тару для последующей передачи на участок финишных операций.

Применение процесса литья по газифицируемым моделям позволяет исключить энергоемкие, трудоемкие, экологически опасные процессы, такие, как приготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление из них традиционным способом форм и стержней, выбивку отливок и сокращение обрубку и очистку отливок более чем на 50%.

Так, отсутствие традиционных форм и стержней при изготовлении отливок массой до 1000 кг позволяет сократить количество вспомогательных литейных материалов до 4: кварцевый песок, противопригарные покрытия, пенополистирол, пленка полиэтиленовая, расход которых составляет (на 1 т годного литья) 100, 25, 6 кг и 10 м<sup>2</sup> соответственно.

В связи с возможностью размещения при этом методе литья моделей (отливок) в контейнере во всем его объеме (пространственное) в отличие от традиционных методов литья в формах, где они находятся только в плоскости разъема формы, выход годного по стальному и чугунному литью возрастет до 70–90%.

Повышение размерной точности отливок данной номенклатуры до уровня 6–7-го класса против 9–11-го класса по ГОСТ 26645-85 дает возможность снизить массу литья не менее чем на 15%, а в случае замены литья по выплавляемым моделям равнозначной точности обеспечит снижение энергетических, материальных затрат и трудоемкости в 2–4 раза.

Исключение из технологического процесса трудоемких операций, как смесеприготовление, изготовление стержней, сокращения финишных операций на 50%, позволяет достичь снижения трудоемкости производства отливок на 20–40%, а численность производственного персонала и площади – соответственно в 1,5–2,0 и 2–3 раза в сравнении с современными способами литья в песчаные формы.

В технологическом процессе получения литейных пенополистироловых литейных моделей, в том числе при вспенивании полистирола, изготовлении моделей в автоклавах, на полуавтоматах и механическом их изготовлении образуются отходы пенополистирола.

С целью нейтрализации и утилизации этих отходов в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины разработаны технологии компактирования отходов пенополистирола путем его термической обработки и растворения в нетоксичных растворителях. При этом их объем уменьшается в 100–200 раз (плотность 500–1000 кг/м<sup>3</sup>), т. е. снижается до объема 2–3 м<sup>3</sup> и в таком виде может накапливаться в действующем производстве до его транспортировки в зону захоронения. Вместе с тем, в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины разработаны технологии изготовления из отходов пенополистирола литейных связующих, лаков, красок и теплоизоляционных декоративных плит, используемых в строительстве. При необходимости возможен сбор бытовых отходов полистирола и организация массового производства вышеуказанных материалов. Указанные разработки защищены шестью патентами на изобретения.

Расширение объема литейного производства за счет его реконструкции на основе новых методов литья по газифицируемым моделям не приведет к экологической напряженности и негативному воздействию на окружающую среду, а наоборот, существенно сократит вредные выбросы пыли и газов в атмосферу цеха и окружающую среду.

До настоящего времени в литейном производстве применяется технология литья в песчаные формы со стержнями, при этом расход формовочных, стержневых материалов, бентонита, связующих, покрытий составляет не менее 2500, 500, 100, 120 и 80 кг. Применение метода литья по газифицируемым моделям потребует расход кварцевого песка до 100 кг, противопожарного покрытия – 25, полистирола – 6 кг, а остальные материалы, присущие литью в песчаные формы, вовсе отсутствуют. Это позволяет сократить вредные выбросы пыли и газов в окружающую среду при производстве стального литья в 10 раз.

Для защиты субъектов и окружающей среды при проектировании литейного цеха ЛГМ предусматриваются системы пассивной и активной экологической защиты, которые входят в его состав и являются уникальными:

- вакуум-всасывающие системы удаления и локализации вредных выбросов, образующихся при заливке металла в форму, затвердевании, охлаждении и удалении отливок из формы и транспортировка их в системы окончательной нейтрализации;

- установки термokatалитического дожигания газов;
- установки терморегенерации формовочного песка;
- герметично закрытая вакуум-транспортная система регенерации формовочного материала;
- газоочистная система для очистки вредных выбросов при плавке металла в индукционных печах.

К тому же широко используются система оборотного водоснабжения на всех технологических переделах производства отливок по газифицируемым моделям, местные отсосы вредных выбросов от оборудования, которое работает с тепло-, газо- и пылевыведением.

Производство моделей осуществляется на участке изготовления пенополистироловых моделей, где находится оборудование, которое может образовывать вредные выбросы. Вместе с тем, исследования, проведенные в ФТИМС НАН Украины, показали, что показатели содержания вредных веществ в атмосфере рабочей зоны этого оборудования значительно ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Содержание вредных веществ в рабочей зоне оборудования участка производства литейных полистироловых моделей

Процесс (оборудование)	Содержание вредных веществ, мг/м <sup>3</sup>			
	изопентан	бензол	толуол	стирол, бензальдегид
Предварительное вспенивание (ванны вспенивания, предвспениватель)	3,2–3,6	0,3–1,8	0,2–0,5	Не обнаружены
	5,0*	5,0 -15,0*	50,0* (по ГОСТ 12.1.005)	
Изготовление моделей: после изготовления моделей при раскрытии пресс-форм в процессе изготовления (при открытии автоклава. Пресс-формы на полуавтомате и сбросе пара из агрегатов)	3,6–4,0	0,2–0,8	0,1–0,2	Не обнаружены
	5,0*	5,0 -15,0*	50,0*	
	2,3–3,0	Не обнаружен	Не обнаружен	Не обнаружены
	5,0*			

\* Предельно допустимые концентрации в рабочей зоне оборудования (ГН 2.2.5.1313–03).

Анализ полученных данных в сопоставлении со значениями ПДК для образующихся паров вредных веществ показывает, что нет необходимости в создании специальных систем их нейтрализации.

При разработке новых технологических процессов особенно важно было создать систему экологической безопасности, которая позволяет идеально защитить биологические объекты и окружающую среду от вредных выбросов, образующихся в результате термодеструкции газифицируемой модели. Для этой цели в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины были проведены соответствующие исследования условий термодеструкции пенополистироловых моделей на всей стадии их контакта с жидким, затвердевающим металлом и при охлаждении отливки.

При этом были установлены два периода термодеструкции пенополистироловой модели в форме: при заполнении формы металлом и при затвердевании и охлаждении в ней отливки. При этом второй период характеризуется конденсацией продуктов термодеструкции на зернах формовочного материала, что указывает на необходимость обязательного его периодического обезвреживания. Конечными продуктами термодеструкции являются водород H<sub>2</sub>, оксид углерода CO, метан CH<sub>4</sub>, этилен, этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, ацетилен C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, пропилен C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> и углеводород C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub> [6].

Также были установлены технологические пределы, которые создают наибольшую концентрацию вредных выбросов. Так, при заливке форм металлом в температурном интервале 1250–1550 °С количество выделившихся газов составило 23 см<sup>3</sup>/г пенополистирола. Состав образующихся при этом газов приведен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Качественные и количественные характеристики продуктов термодеструкции полистирола

Формула	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
Масса	1,64	12,92	60,2	4,72	3,36	4,48	5,77	0,17	0,63	0,1	5,77
Объем, см <sup>3</sup> /2 г	48,4	20,8	110,8	8,9	10,8	8,2	9,9	0,35	0,78	0,1	4,1

Концентрация стирола ниже ПДК (5 мг/м<sup>3</sup>) и составляет в зоне заливки 1,5–2,0 мг/м<sup>3</sup>, а над литейной формой – 4,0–4,5 мг/м<sup>3</sup>. Концентрация толуола в зоне заливки не превышает ПДК – 50 мг/м<sup>3</sup> и составляет 45–48 мг/м<sup>3</sup>, а над формой превышает ПДК и составляет 75–80 мг/м<sup>3</sup>. Концентрация бензола как в зоне заливки (10 мг/м<sup>3</sup>), так и над формой (16–18 мг/м<sup>3</sup>) не превышает ПДК (20 мг/м<sup>3</sup>).

При исследовании количественного и качественного состава продуктов термодеструкции ГМ в период охлаждения отливок из железоуглеродистых сплавов установлено, что общее количество выделяющихся газов  $q_{\text{ох}} = 310\text{--}320$  см<sup>3</sup>/г. Концентрация стирола над формой достигает к концу охлаждения 10–12 мг/м<sup>3</sup> и в зоне заливки – 6–7 мг/м<sup>3</sup>, что превышает ПДК. Концентрация толуола к концу охлаждения составляет в зоне заливки 1–2 мг/м<sup>3</sup> и над формой – 25–28 мг/м<sup>3</sup>, т. е. значительно ниже ПДК. Концентрация бензола к концу охлаждения составляет в зоне заливки 4–5 мг/м<sup>3</sup> и над литейной формой – 3–8 мг/м<sup>3</sup>, что значительно ниже ПДК. Концентрация тяжелых углеводородов в воздушной среде падает к концу охлаждения отливки и составляет в зоне заливки 50–100 мг/м<sup>3</sup>, а над литейной формой – 280–300 мг/м<sup>3</sup>, т. е. не выходит за допустимые нормы ПДК.

При выбивке формы количество паров стирола, толуола, бензола в зоне выбивки превышает ПДК в 1,5–2,0 раза.



Рис. 1. Распределение объемов выбросов по технологическим операциям при различных способах литья: *а* – объем выбросов, т/тыс. т литья в песчано-глинистые формы (ПГФ) и холоднотвердеющие смеси (ХТС); выход готового продукта – 70%; объем выбросов пыли – 1–2 млн. т/год; *б* – объем выбросов, т/тыс. т литья при ЛГМ; выход готового продукта – 85%; объем выбросов пыли – 0,6–1,2 млн. т/год, сокращение выбросов – 0,4 млн. т/год

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что наибольшее количество вредных выбросов образуется при заливке формы и охлаждении в ней отливок, а также при их удалении из формы.

Исследования условий накопления конденсированных продуктов термодеструкции ГМ на зернах формовочного материала показали, что при многократном его использовании содержание вредных веществ составляет 0,3–0,5% от массы формовочного материала.

На основании проведенных исследований и разработки исходных данных ФТИМС НАН Украины и Институтом газа НАН Украины была разработана гамма установок термокаталитического дожигания вредных газов производительностью 3–24 м<sup>3</sup>/мин и регенерации песка производительностью 0,25–10 т/ч.

В основе технологии обезвреживания продуктов термодеструкции пенополистирола лежит предварительный нагрев воздушно-газовой среды, которая поступает из формы (от вакуумного – водокольцевого насоса), от рабочих мест заливки форм, зоны охлаждения отливок и их удаления (вентиляционная система) до температуры 450–500 °С. При этих условиях нагрева все продукты термодеструкции модели образуют только газовую смесь, которая вступает в контакт с катализатором. В результате контакта газовой смеси все продукты окисляются до уровня 98% и в виде паров воды и двуоксида углерода выбрасываются в атмосферу.

Для реализации этой технологической схемы создана установка дожигания отходящих газов УДК400. Суть работы этой установки заключается в следующем. Воздушно-газовая смесь, содержащая продукты термодеструкции полистирола, поступает в теплообменник установки, где предварительно нагревается до температуры 250–300 °С, а затем по воздуховоду поступает в нижнюю часть печи сопротивления с теплообменником и там уже газовая смесь нагревается до 450–500 °С. Разогретая газовая смесь поступает в кассету с гранулированным или сетчатым катализатором, где окисляется с образованием паров воды и двуоксида углерода, а затем через вентиляционную систему эти нейтрализованные газы удаляются в окружающую среду.

Через десять циклов использованный огнеупорный наполнитель проходит обезвреживание от конденсированных в нем продуктов деструкции пенополистироловых моделей на установке термокаталитического обезвреживания по маршруту: выбивное устройство, приемный бункер, магнитный сепаратор, сито барабанное, холодильник, блок бункеров, питатель, установка термокаталитического обезвреживания, блок бункеров, бункер расходный блока снаряжения контейнеров. В остальные циклы формовочный песок проходит те же операции, минуя установку термокаталитического обезвреживания.

При использовании метода ЛГМ уменьшение объема выбросов вредных веществ в атмосферу может составлять до 40% (рис. 1, б) при сохранении объема выпущенного литья.

Если на основе современных технологий и научных решений не снижается в 1,5 раза расход материальных и энергетических ресурсов, то нельзя говорить об эффективности литейного производства и удовлетворении потребности в литье большинства промышленных отраслей.

Для повышения экономической эффективности литейного производства нужно снижать массу отливок и ужесточать требования ГОСТ 26645-85, ГОСТ Р 53464–2009, указывая в них более высокие требования к точности литья.

В настоящее время 70% от массы автомобиля составляют литые детали. Поэтому для уменьшения массы литья без снижения эксплуатационных свойств и прочностных характеристик необходимо усовершенствовать литейные материалы и технологии так, чтобы уменьшить массу и толщину стенок отливок.



Рис. 2. Металлоемкость продукции машиностроения, %: *a* – в настоящее время; *б* – по прогнозу при использовании новых технологий и повышении точности литья, его масса должна уменьшиться в 2 раза

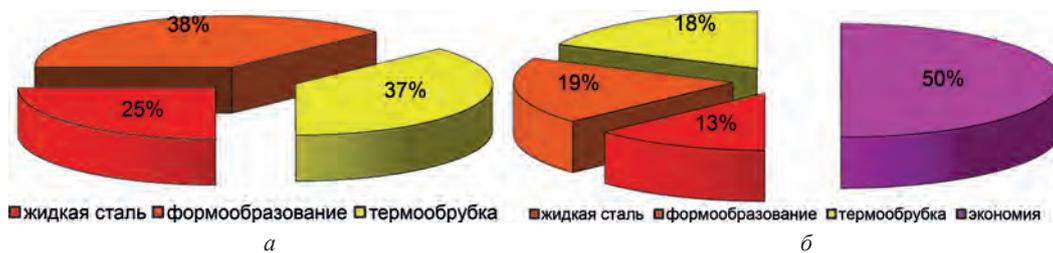


Рис. 3. Сравнительная себестоимость получения отливок из стали 35Л: *a* – цеховая себестоимость получения отливки массой 6,5 кг при литье в песчаные формы; *б* – цеховая себестоимость получения отливки массой 4,5 кг при литье с использованием комплексных технологий по газифицируемым моделям

На рис. 2, *a* 70% – это масса литых деталей или металлоемкость каждой машины сегодня. Если за счет использования новых технологий мы ее снизим до 50% (рис. 2, *б*), то уменьшим массу готовых изделий на 40%. Отсюда будет следовать экономическая эффективность – уменьшение затрат на производство тонны литья на 30% за счет снижения себестоимости и сохранения цены на продукцию. Кроме того, объем вредных выбросов будет сокращен пропорционально уменьшению общей металлоемкости. Цена литья станет инвестиционно привлекательной. Ни одна другая технология не позволяет снижать себестоимость на 30%, а это соответствует решению экономической задачи:

- экономии основных и вспомогательных материалов на 40–90%;
- снижению вредных выбросов в окружающую среду в 8–10 раз;
- уменьшению энергозатрат (расхода электроэнергии и газа) на 40%.

Такие перспективы заманчивы для литейщиков и делают производство рентабельным. Снижение цены конечной продукции за счет использования новых технологий способствует привлечению инвестиций в литейную отрасль.

К примеру, заметное количество литейных заводов выпускает литые подкладки, стоимость которых была выше стоимости сварных подкладок. Методом ЛГМ их можно отливать из стали и высокопрочного чугуна массой не 6,3 кг, а 4,5 кг. Если заменить технологию литья в песчаные формы, ХТС и другие, ныне применяющиеся, на литье по газифицируемым моделям, то экономия литья и снижение себестоимости продукции составят 50% за счет повышения точности литья (рис. 3).

Если рассмотреть себестоимость чугунного литья разными способами (рис. 4), можно получить экономию затрат до 44% за счет снижения металлоемкости.

Особенно значительная экономия получается при литье сложных отливок из износостойких сталей (шнеки для машин производства кирпича, била, молотки и детали дробилок), так как резко снижаются затраты на их механообработку. Методом ЛГМ возможно изготавливать без ограничений по конфигурации конструкции колеса, звездочки, корпуса, сантехнику, головки и блоки цилиндров бензиновых и дизельных двигателей, художественное литье и др. Капитальные затраты на организацию производства сокращаются в 2,0–2,5 раза, так же как и сроки ввода его в эксплуатацию. Легко разместить такие участки при кузнях, термических, ремонтных и других цехах.

Всего три компонента эффективности должны определять будущее литейной индустрии как инвестиционного продукта: новые литые материалы и композиты; новые ресурсосберегающие технологии



Рис. 4. Сравнение себестоимости 1 т литья из серого чугуна, изготовленного по различным технологиям: *a* – в настоящее время; *б* – по прогнозу при использовании новых технологий и повышении точности литья, его масса должна уменьшиться в 2 раза

формообразования для получения высокоточных отливок; использование современного оборудования и технологий для выплавки и внепечной обработки металлов и сплавов.

Производственный потенциал технологии ЛГМ далеко не исчерпан и настолько значителен, что она позволяет лить не только металлы и сплавы, но и получать композиты и армированные конструкции, которые обладают повышенными в несколько раз служебными свойствами. При этом в модель предварительно вставляют различные детали или материалы, которые формируют композит или армированную конструкцию, а наложение избыточного давления на жидкий металл увеличивает надежность пропитки таких изделий со вставками на длину свыше 1 м.

ЛГМ относят к технологиям будущего, учитывая ее экологичность и высокую степень оборотного использования материалов.

### Литература

1. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
2. Рыбаков С. А. Инновационные возможности литья по газифицируемым моделям, состояние и перспективы этого метода в России // Литейщик России. 2009. № 4. С. 44–45.
3. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Взаимосвязанные процессы переноса в песчаной форме при литье по одноразовым моделям // Металл и литье Украины. 2009. № 9. С. 15–18.
4. Shinsky I., Shalevska I., Musbah Ja. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. TEKA. Edition of Lublin University of technology. Vol. XD, Lublin. 2015. (English).
5. Шалевская И. А., Богдан А. В., Шинский В. О. Экологический мониторинг образования вредных выбросов в цехе литья по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. 2015. № 2. С. 21–25.
6. Шинский О. И., Шалевская И. А. Образование и нейтрализация вредных выбросов при производстве литья с использованием моделей из пенополистирола // Металл и литье Украины. 2016. № 1. С. 21–25.

### References

1. Shulyak V. S. *Lit'jo po gazificiruemyh modeljam* [Lost Foam Casting]. St. Petersburg, NPO «Professional» Publ., 2007, 408 p.
2. Rybakov S. A. Innovacionnye vozmozhnosti lit'ja po gazificiruemyh modeljam, sostojanie i perspektivy jetogo metoda v Rossii [Innovative possibilities of lost foam casting, condition and prospects of this method in Russia]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundryman*, 2009, no. 4, pp. 44–45.
3. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P. Vzaimosvjazannye processy perenosa v peschanoj forme pri lit'e po odnorazovym modeljam [Interconnected transfer processes in sand mold during casting by disposable patterns]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, 2009, no. 9, pp. 15–18.
4. Shinsky I., Shalevska I., Musbah Ja. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. TEKA. Edition of Lublin University of technology, Vol. XD, Lublin, 2015 (in English).
5. Shalevsckaya I. A., Bogdan A. V., Shinskiy V. O. Jekologicheskij monitoring obrazovanija vrednyh vybrosov v chehe lit'ja po gazificiruemyh modeljam [Ecological monitoring of formation of harmful emissions in shop of lost foam casting]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, 2015, no. 2, pp. 21–25.
6. Shinskiy O. I., Shalevsckaya I. A. Obrazovanie i nejtralizacija vrednyh vybrosov pri proizvodstve lit'ja s ispol'zovaniem modelej iz penopolistirola [Formation and neutralization of harmful emissions in the casting manufacture using models of expanded polystyrene]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, 2016, no. 1, pp. 21–25.