



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>
УДК 621.744.3

Поступила 27.05.2019
Received 27.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ С АРМИРУЮЩЕЙ ФАЗОЙ

И. А. ШАЛЕВСКАЯ, Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина, пр. Вернадского, 34/1. E-mail: into66@mail.ru

В качестве базового технологического процесса рассмотрен метод литья по газифицируемым моделям с использованием армирующей фазы, установленной внутри пенополистироловой модели. При этом возникают новые для теории литейных процессов многокомпонентные системы: «металл–модель–имплантат–форма» и «металл–армирующая фаза–форма». Исследовано влияние макроармирующих элементов, установленных ориентированно в форме в виде стальных стержней, на процессы тепломассопереноса, затвердевания и гидродинамики. Моделирование процесса производили с использованием программы «ProCast» оценкой условий затвердевания в песчаной литейной форме литых образцов из медных сплавов и армирующей фазы из углеродистой стали. Для сравнения результатов моделировали процесс затвердевания литых образцов размером 10×200 мм без армирующей фазы и с армирующей фазой в виде стержней, занимающих 20 и 50% площади ее сечения. Результаты исследований приведены в виде графических зависимостей температуры охлаждения от времени. Установлено, что использование в литейной форме армирующей фазы оказывает существенное влияние на снятие перегрева металла за счет расхода определенного количества теплоты на нагрев армирующей фазы, увеличивает скорость затвердевания сплава и охлаждения отливки.

Ключевые слова. *Литье по газифицируемым моделям, армирующая фаза, температура перегрева, кинетика затвердевания, охлаждение отливки, скорость затвердевания, кристаллизация, отливка, жидкая фаза, контактная поверхность.*

Для цитирования. *Шалевская, И. А. Исследование теплообменных процессов в литейной форме с армирующей фазой / И. А. Шалевская // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 54–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>.*

RESEARCH OF HEAT-EXCHANGE PROCESSES IN A CASTING FORM WITH REINFORCING PHASE

I. A. SHALEVSKAY, Physical-Technological Institute of Metals and Alloys National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Acad. Vernadskogo ave. E-mail: into66@mail.ru

The method of lost foam casting with the reinforcing phase installed inside the polystyrene foam model is considered as a basic technological process. In The new multicomponent systems for the theory of foundry processes will be created in this case: «metal–model–implant–mold» and «metal–reinforcing phase–mold». The influence of the installed macroreinforcing elements in the form of steel rods on the heat and mass transfer was researched, solidification and hydrodynamics is investigated. The process was modeled using the ProCast program by evaluating the solidification conditions in the sand casting mold of cast samples from copper alloys and the reinforcing phase from carbon steel. To compare the results, the process of solidification of cast specimens with a size of 10×200 mm without a reinforcing phase and with a reinforcing phase in the form of rods occupying 20 and 50% of its cross section area was modeled. The research results are presented in the form of graphical curves of the cooling temperature and time. It has been established that the use of a reinforcing phase in a casting mold has a significant impact on the removal of metal overheating due to the consumption of a certain amount of heat for heating the reinforcing phase, increases the rate of alloy hardening and casting cooling.

Keywords. *Lost foam casting process, reinforcing phase, overheating temperature, solidification kinetics, casting cooling, solidification rate, crystallization, casting, liquid phase, contact surface.*

For citation. *Shalevskaya I. A. Research of heat-exchange processes in a casting form with reinforcing phase. Foundry production and metallurgy, 2019, no. 3, pp. 54–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>.*

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов Национальной академии наук Украины под руководством д-р техн. наук, проф. О. И. Шинского созданы теоретические и технологические основы литья по газифицируемым моделям в вакуумируемые формы как минимум в десяти различных модификациях, включая получение моно- и армированных отливок [1], литых конструкций с дифференци-

альными свойствами из железоуглеродистых, цветных сплавов с использованием гравитационной заливки металла и под высоким регулируемым давлением. Эти разновидности методов литья различаются и по способу применения моно-, высокопористых пенополистироловых моделей, а также моделей, наполненных макро-, микроармирующей фазой и модифицирующими, легирующими компонентами.

В работе [2] были подробно изучены и исследованы процессы теплообмена и газогидродинамики, а также разработаны математические модели процесса литья по газифицируемым моделям, при этом не исследовалось использование армирующей фазы.

При изготовлении армированных отливок в качестве базового был использован метод литья по газифицируемым моделям как наиболее перспективный метод литья и «гибкий» в плане управления структурой и свойствами отливки. В данном методе литья литейная форма и пенополистироловая модель могут использоваться как активно-функциональная система и инструмент для управления структурой и свойствами отливки [3].

Процессы производства армированных отливок методом литья в формах, в которых размещаются макроимплантаты (армирующие элементы) различной геометрии, сопровождаются сложными газогидродинамическими и теплообменными процессами. При получении отливок путем армирования их макроимплантатами, расположенными в полости литейной формы или в пенополистироловой модели, возникают новые для теории литейных процессов многокомпонентные системы: «металл–модель–имплантат–форма» и «металл–армирующая фаза–форма» [4].

В разрабатываемых новых технологиях получения армированных отливок и литых конструкций армирующую фазу целесообразно использовать в виде ориентированных в форме гибких нитей или стержней. Наличие такого вида макроармирующей фазы (МАФ) видоизменяют условия теплообмена и гидродинамики литья как в сравнении с традиционными полыми формами, так и в сравнении с формами с плотноупакованной в ней макроармирующей фазой. Некоторые ученые [5] производили численное моделирование изменения теплопроводности армированных отливок, но данный метод проверялся только на чугунных отливках с керамической армирующей фазой и имеет высокую погрешность при увеличении объемной доли армирующей фазы. Поэтому возникла необходимость исследования влияния металлической армирующей фазы (в данном случае из углеродистой стали) в матричном медном сплаве.

Для исследований закономерностей теплопереноса, затвердевания и гидродинамики заполнения формы с МАФ, ориентированной в ней, воспользуемся современной программой компьютерного моделирования «ProCast» путем оценки условий затвердевания в песчаной форме литых образцов раз-

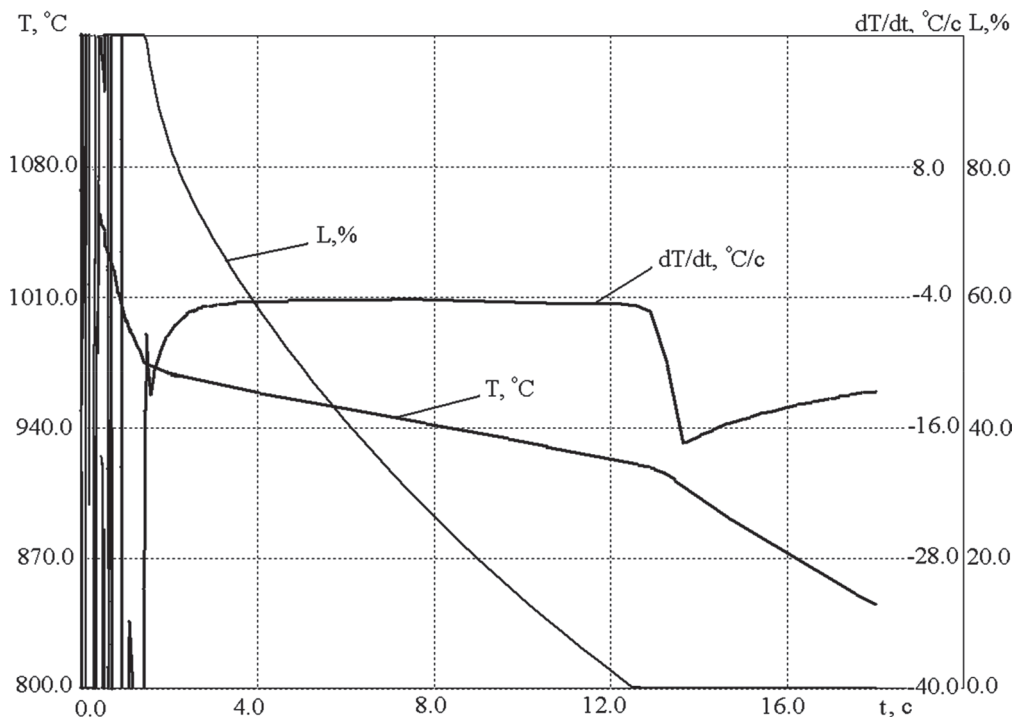


Рис. 1. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\varnothing 10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на контактной поверхности «металл – форма»: L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °C; t – время охлаждения, с

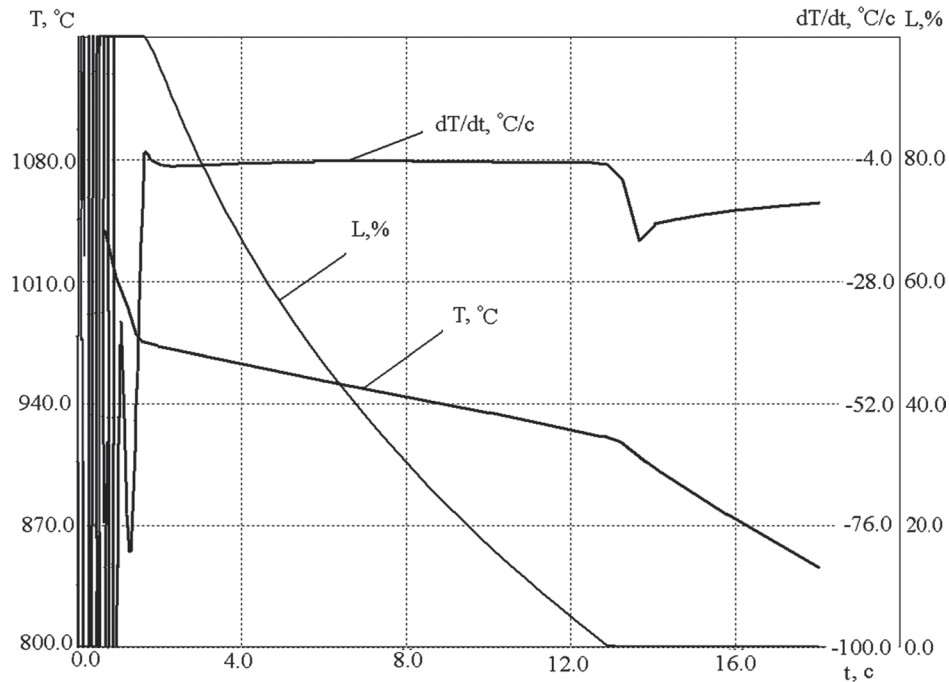


Рис. 2. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\text{Ø}10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на 1/4 ее толщины: L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °C; t – время охлаждения, с

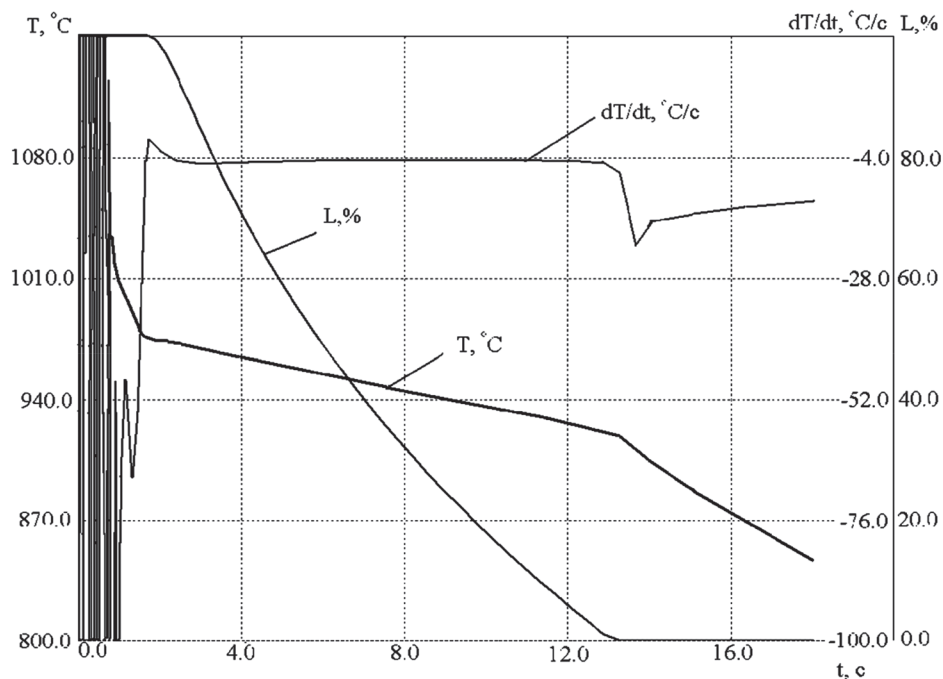


Рис. 3. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\text{Ø}10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на 1/2 ее толщины: L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °C; t – время охлаждения, с

мером $\text{Ø}10 \times 200$ мм с армирующей фазой в виде стержней, занимающих 20 и 50% площади ее сечения. В качестве моделирующего сплава использовали медный сплав латунь ЛЦ14К3С и армирующую фазу из стали 20.

При компьютерном моделировании затвердевания образца диаметром 10 мм из латуни (ЛЦ14К3С) в полый форме установлено, что на поверхности контакта «металл–форма» этот сплав достигает температуры T_1 (начало кристаллизации) через 1,1 с (рис. 1), а температуры T_s (солидус) – через 12,5 с.

В этот же период в точке, равной 1/4 диаметра отливки этого стержня, сплав достигает температуры T_1 через 1,5 с (рис. 2), а температуры T_s – через 13,0 с. В центре стержня в этот же период сплав достигает температуры T_1 через 1,8 с (рис. 3), а температуры T_s – через 13,2 с, тогда и исчезает жидкая фаза во всех сечениях отливки.

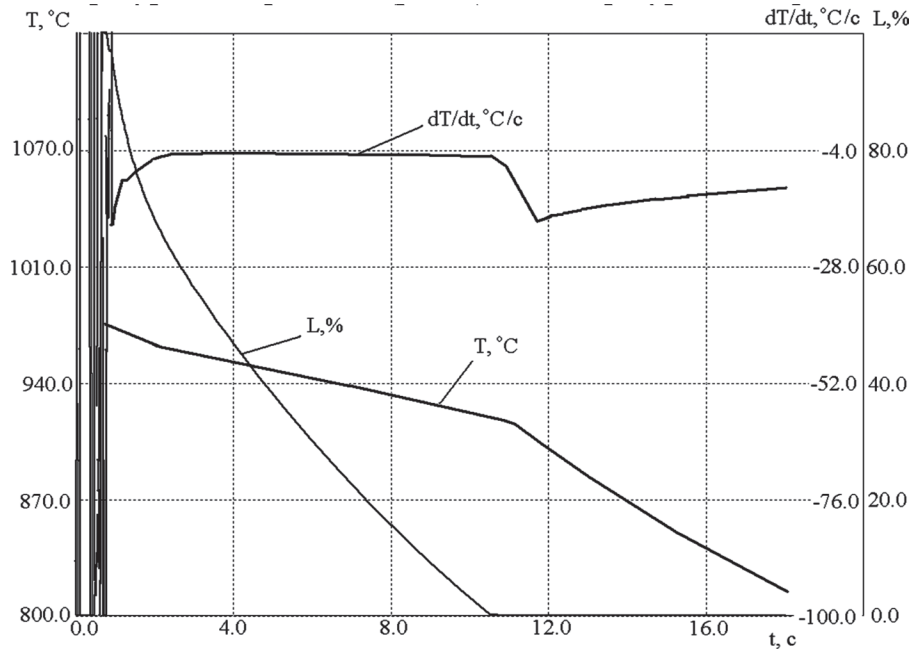


Рис. 4. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\varnothing 10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на контактной поверхности «металл–форма» при наличии МАФ ($0,2 F_{отд}$): L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °С; t – время охлаждения, с

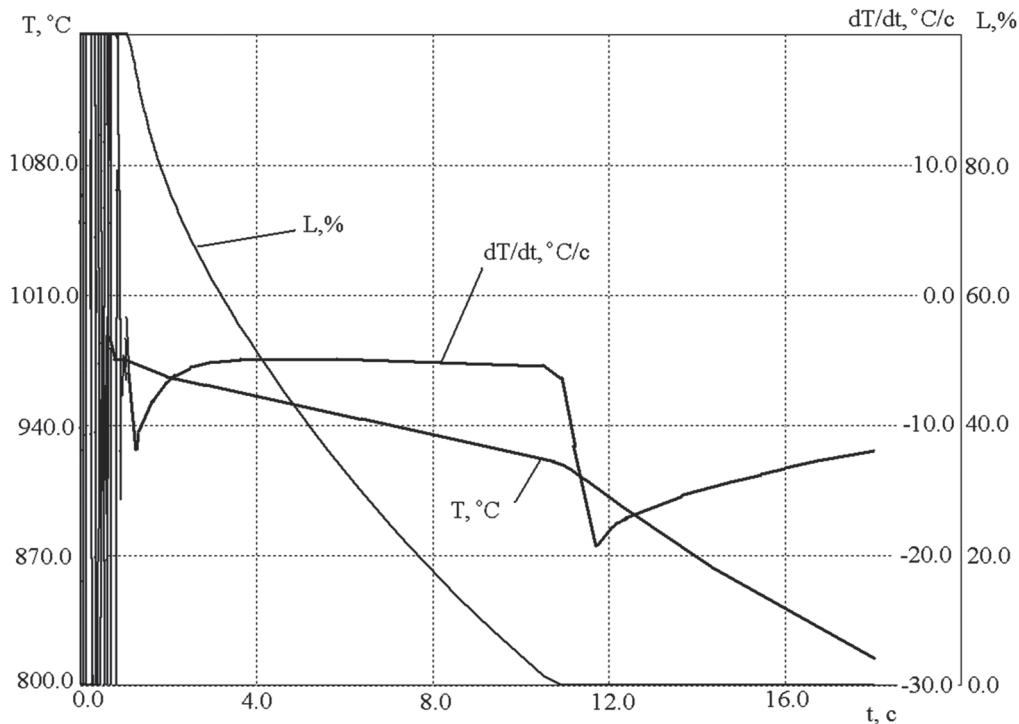


Рис. 5. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\varnothing 10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на 1/4 ее толщины при наличии МАФ ($0,2 F_{отд}$): L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °С

При затвердевании же стержня диаметром 10 мм из латуни типа ЛЦ14К3С в форме с МАФ, составляющей 1/5 ее сечения, установлено, что на поверхности контакта «металл–форма» этот сплав достигает температуры T_1 уже через 0,5 с (рис. 3), а температуры T_s – через 10,2 с.

В этот же период в точке, равной 1/4 диаметра отливки этого стержня, сплав достигает температуры T_1 через 0,3 с (рис. 4), а температуры T_s – через 11,0 с.

На границе «металл–МАФ» в этот же период сплав достигает температуры T_1 через 0,1 с (рис. 5), а температуры T_s – через 10,0 с, тогда и исчезает жидкая фаза во всех сечениях отливки.

Следует отметить, что в этих условиях центр МАФ прогревается до температуры 980 °С уже через 0,5 с, а затем охлаждается со скоростью 6–8 °С/с (рис. 6).

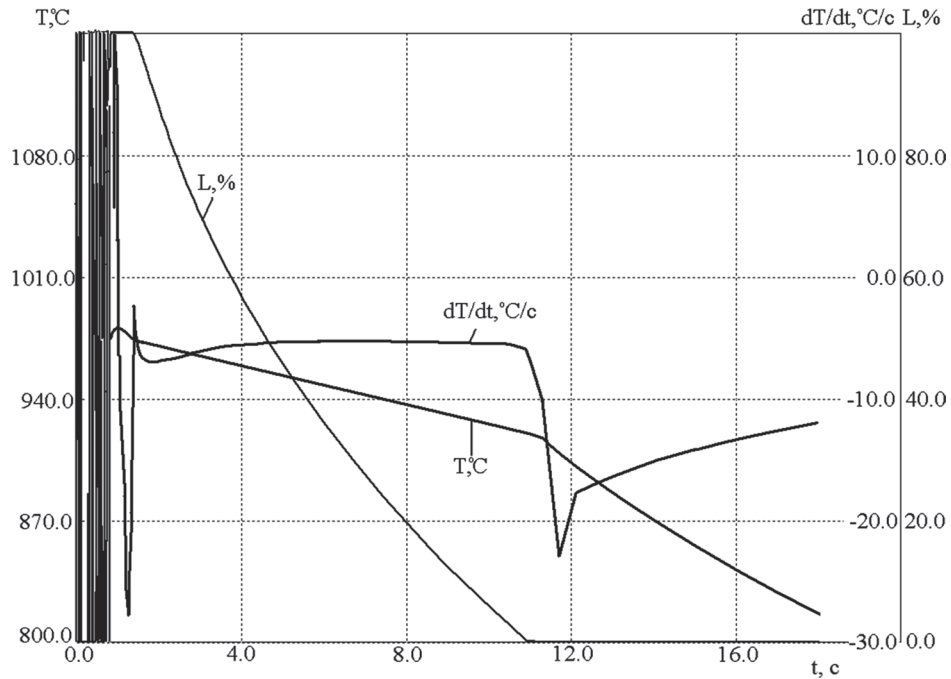


Рис. 6. Кинетика затвердевания и охлаждения отливки ($\varnothing 10 \times 200$ мм) из латуни ЛЦ14К3С на поверхности контакта с МАФ ($0,2 F_{отл}$): L – количество жидкой фазы в затвердевающем металле, %; T – температура затвердевающего металла, °С; t – время охлаждения, с

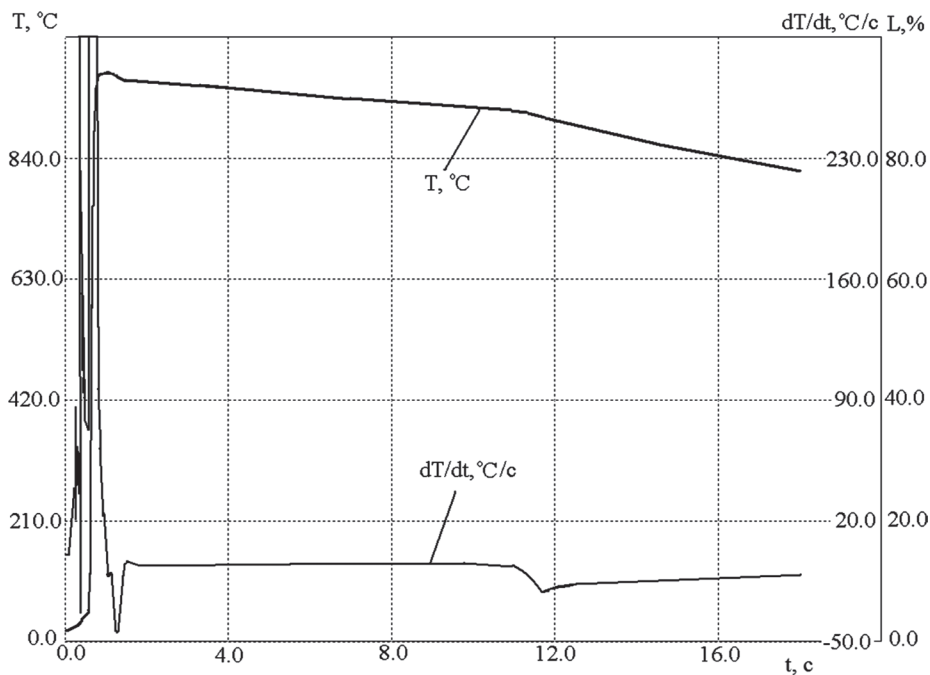


Рис. 7. Кинетика нагрева и охлаждения МАФ ($0,5 F_{отл}$): T – температура нагрева, охлаждения МАФ, °С; t – время охлаждения, с

При затвердевании стержня диаметром 10 мм из латуни типа ЛЦ14К3С в форме с МАФ, составляющей $1/2$ ее сечения, установлено, что на поверхности контакта «металл – форма» этот сплав достигает температуры T_1 уже через 0,3 с (рис. 7), а температуры T_s – через 3,0 с. В этот же период в точке, равной $1/4$ диаметра отливки и на границе «металл–МАФ», сплав достигает температуры T_1 через 0,2 с (рис. 7), а температуры T_s – через 2,7 с, тогда и исчезает жидкая фаза во всех сечениях отливки. Следует отметить, что в этих условиях центр МАФ прогревается до температуры 980 °С уже через 0,5 с, а затем охлаждается со скоростью 6–8 °С/с (рис. 7).

Важно также отметить, что скорость снятия перегрева расплава до T_1 во всех экспериментах отличается друг от друга. Так, при затвердевании стержня в полый форме эта скорость составляет 50–70 °С/с,

причем меньшее значение относится к центральной части отливки, а скорость охлаждения последней составляет уже 13–15 °C/с, где большее значение относится к поверхности стержня.

При затвердевании стержня в форме, где находится МАФ, составляющая 1/5 ее сечения, скорость достижения расплавом T_1 составляет 150–800 °C/с, причем большее значение относится к части отливки, прилегающей к границе МАФ, а скорость охлаждения последней составляет уже 15–22 °C/с, где большее значение относится к контактной поверхности «металл – МАФ».

При затвердевании стержня в форме, где находится МАФ, составляющая 1/2 ее сечения, скорость достижения расплавом T_1 составляет 250–400 °C/с, причем большее значение относится к части отливки, прилегающей к границе МАФ, а скорость охлаждения последней составляет уже 18–20 °C/с, где большее значение относится к контактной поверхности «металл–МАФ».

Выводы

- Существенное влияние наличие МАФ в форме оказывает на снятие температуры перегрева до температуры T_1 , которая превышает аналогичную при затвердевании отливки в полый форме в 3–12 раз, при этом смещение жидкой фазы вызвано расходом определенного количества теплоты на нагрев армирующей фазы;
- наличие МАФ создает условия для увеличения скорости затвердевания сплава прямо пропорционально ее массе и с увеличением ее относительно объема металла в форме, при этом армирующая фаза замещает пустоты в форме, что предотвращает образование объемных раковин;
- в связи с тем что начальная температура АФ равняется температуре окружающей среды, то на начальном этапе имеем большой градиент перепада температур, за счет этого центр МАФ прогревается до температуры 980 °C уже через 0,5 с, а затем охлаждается со скоростью 6–8 °C/с (рис. 7);
- на охлаждение отливки наличие МАФ в форме также оказывает влияние, но уже в меньшей мере, соотношение между скоростью охлаждения стержня в полый форме и при наличии МАФ составляет только 1/ (1,15–1,5), при этом происходит не поверхностное, а объемное затвердевание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шинский О. И., Марукович Е. И., Шалевская И. А. и др. Экономика, экология, организация производств литья по газифицируемым моделям // Литье и металлургия. 2017. № 4. С. 53–59.
2. Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям: дис. ... д-р техн. наук. Киев, 1997. 473 с.
3. Романенко Ю. Н., Афтандилянц Е. Г., Шинский И. О., Пеликан О. А. Оценка изменения коэффициента теплопроводности армированных отливок // Процессы литья. 2009. № 2. С. 62–66.
4. Shinsky O., Shalevska I. и др. Principles of construction and identification of a multilevel system for monitoring parameters of technological cycle of casting // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2018. Т. 5. № 1 (95). С. 43–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141303>.
5. Shinsky I., Shalevska I., Musbah Ja. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. ТЕКА. Edition of Lublin University of technology. Vol. XD, Lublin. 2015. (English).

REFERENCES

1. Shinsky O. I., Marukovich E. I., Shalevska I. A. i dr. Ekonomika, ekologiya, organizatsiya proizvodstv litya po gazifitsiruemyim modelyam [Economy, ecology, organization of foundry production by lost foam casting]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4. pp. 53–59. (in Russian) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-53-59>.
2. Shinsky O. I. Gazogidrodinamika i tehnologii litya zhelezouglerodistyih i tsvetnyih splavov po gazifitsiruemyim modelyam. Diss. dokt. tekhn. nauk [Gas-Hydrodynamics and Technology of Casting Iron-Carbon and Non-Ferrous Alloys by Gasified Models. Dr. tech. sci. diss.]. Kyiv, 1997. 473 p. (in Russian).
3. Romanenko Yu. N., Aftandilyants E. G., Shinsky I. O., Pelikan O. A. Otsenka izmeneniya koeffitsienta teploprovodnosti armirovannyih otlivok [Evaluation of the change in thermal conductivity of reinforced castings]. *Protsessy litya = Foundry Processes*, 2009, no. 2, pp. 62–66. (in Russian).
4. Shinsky O., Shalevska I. i dr. Principles of construction and identification of a multilevel system for monitoring parameters of technological cycle of casting – Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy, 2018. Vol. 5, no. 1 (95). pp. 43–56. DOI: (in English). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141303>.
5. Shinsky I., Shalevska I., Musbah Ja. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. ТЕКА. Edition of Lublin University of technology, Vol. XD, Lublin, 2015 (in English).