



УДК 621.74:517.977

Поступила 09.02.2018

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА В ХРОМИСТЫХ ЧУГУНАХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОТЛИВОК В ПЕСЧАНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ФОРМАХ

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. М. ИЛЬЮШЕНКО, В. А. ПУМПУР, В. М. АНДРИЕНКО, Институт
технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.
E-mail: info@itm.by, lct@tut.by*

Описаны результаты исследований по определению влияния количества углерода в хромистых чугунах на формирование отливок при литье в песчаную и комбинированную формы. Экспериментальные исследования проводились при литье образцов из износостойкого хромистого чугуна с разным содержанием углерода. Представлена микроструктура полученных образцов, выполнен ее анализ. Проведены численные исследования для оценки влияния количества углерода на динамику и кинетику затвердевания отливок в песчаной и комбинированной формах. Установлено влияние количества углерода на процесс затвердевания отливок из хромистого чугуна при литье в песчаную и комбинированную формы. Результаты исследований использованы для изготовления деталей дробильно-размольного оборудования.

Ключевые слова. Износостойкий хромистый чугун, комбинированная форма, песчаная форма, влияние углерода.

INVESTIGATION OF CARBON INFLUENCE IN CHROMIUM CAST IRONS FOR FORMING CASTINGS IN SAND AND COMBINED MOLDS

*E. I. MARUKOVICH, V. M. ILJUSHENKO, V. A. PUMPUR, V. M. ANDRIENKO, Institute of Tehnology
of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str.
E-mail: info@itm.by, lct@tut.by*

The results of research to determine the influence of the amount of carbon in chromium cast irons on the formation of castings in sand and combined molds are described in the article. Experimental studies were carried out with casting samples from wear-resistant chromium cast iron with different carbon contents. The microstructure of the obtained samples is presented, and its analysis is performed. Numerical studies have been carried out to evaluate the effect of the carbon content on the dynamics and kinetics of hardening of castings in sand and combined molds. The influence of the carbon content on the hardening process of chromium cast iron castings during foundry casting in sand and combined molds is established. The results of the research were used for the manufacture parts of crushing and grinding equipment.

Keywords. Wear-resistant chromium cast iron, combined mold, sand mold, influence of carbon.

Наиболее значимым фактором в формировании первичной литой структуры износостойких хромистых чугунов (ИЧХ) является скорость затвердевания отливки. По данным [1], скорость затвердевания может изменяться в широком диапазоне от 0,5 до 200 °С/мин. При этом могут существенно меняться кристаллическое строение и свойства чугуна одного и того же состава при отливке из него деталей различной массы и геометрических размеров. Несмотря на имеющиеся литературные данные [1–3], актуальной задачей является изучение влияния основных карбидообразующих элементов углерода и хрома на процессы кристаллизации.

Исследования проводили на чугуне ИЧХ18ВМ. Экспериментальные сплавы выплавляли в индукционной печи ИСТ-0,25 с основной футеровкой и заливали в специальные формы. Химический состав образцов определяли при помощи измерительного комплекса, включающего спектрограф ДФС-8, генератор ИВС-23, микрофотометр МФ-4 и гигрометр психометрический ВИТ-1 согласно ГОСТ 27809-95 и 22536.1-88, п. 2.

Для проведения экспериментально-теоретических исследований были отлиты три партии образцов в различные виды форм. Первую партию образцов отливали в формы полностью состоящие из ХТС (вариант 1, рис. 1, а), вторую партию – в формы, состоящие из верхней части, выполненной из ХТС, и ниж-

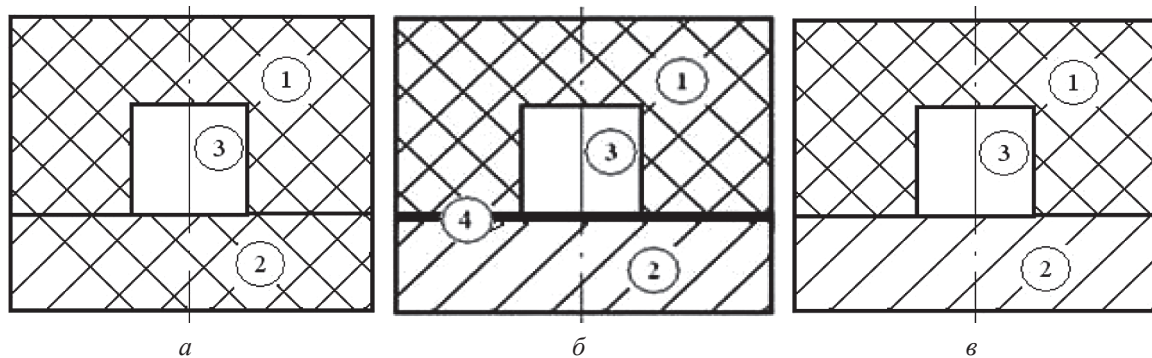


Рис. 1. Виды использованных литейных форм: *a* – форма из ХТС (вариант 1); *б* – форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой термостойкой тканью (вариант 2); *в* – форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой слоем антипригарной краски (вариант 3); 1 – верхняя часть формы (из ХТС); 2 – нижняя часть (*a* – из ХТС, *б*, *в* – сталь 20); 3 – отливка; 4 – термостойкая ткань

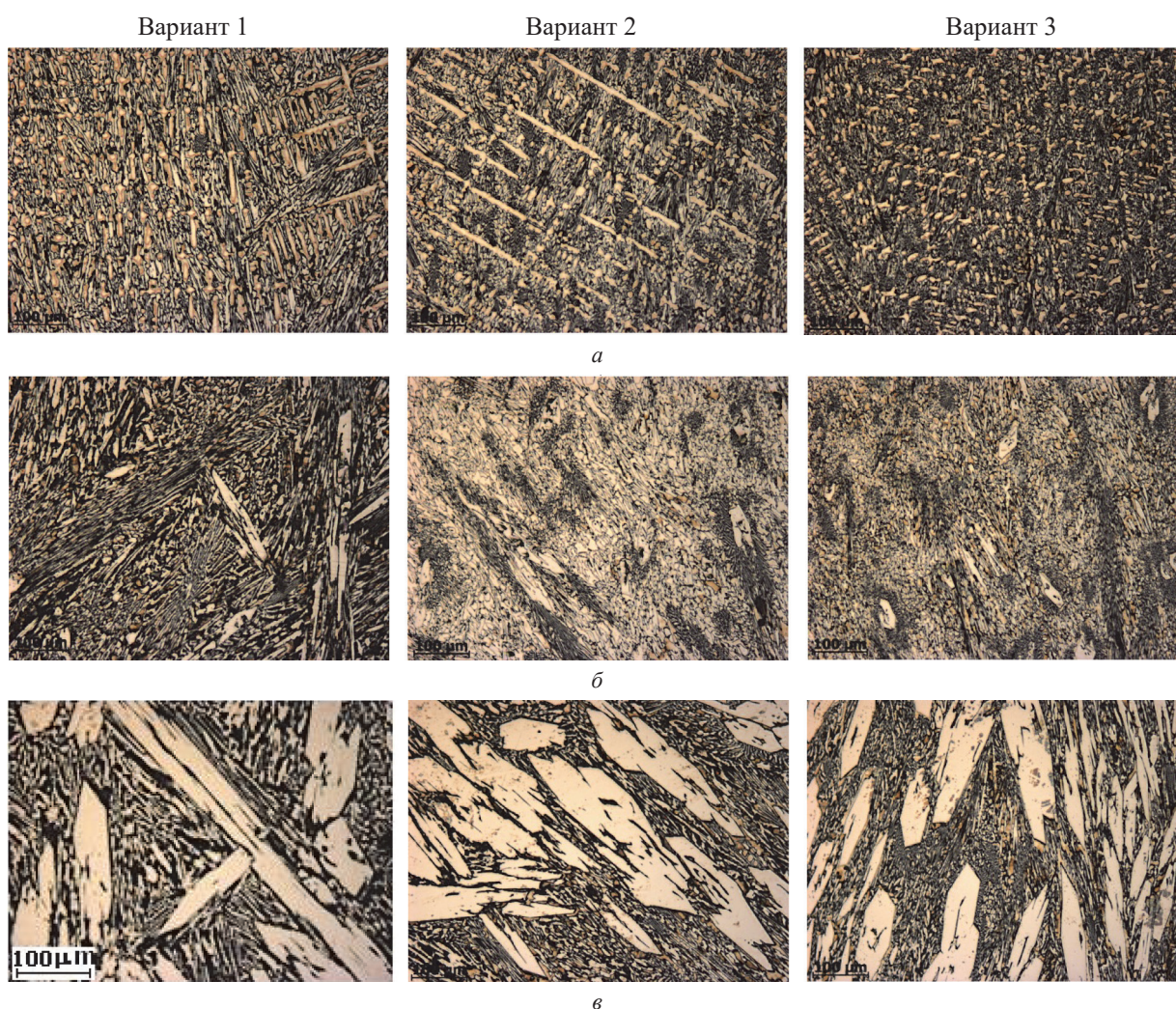


Рис. 2. Микроструктура образцов из чугуна ИЧХ18ВМ с разным содержанием углерода: *a* – содержание углерода 3,25%; *б* – 3,98; *в* – 4,74%

ней части, выполненной из металлической плиты, покрытой термостойкой тканью (вариант 2, рис. 1, *б*), третью партию отливали в формы такие же, как и вторую партию, только без термостойкой ткани на металлической поверхности нижней части 2 (вариант 3, рис. 1, *в*).

Исследования проводили с расплавами чугуна ИЧХ18ВМ при температуре заливки $T_{зал} = 1500$ °С и содержании углерода, равным 3,25; 3,60; 3,98; 4,14; 4,36; 4,74%.

Химический состав образцов приведен в табл. 1, а микроструктура в сечениях образцов с содержанием 3,25; 3,98 и 4,74% углерода для трех вариантов форм представлена на рис. 2.

Таблица 1. Химический состав образцов из чугуна ИЧХ18ВМ с разным содержанием углерода

Содержание элементов, %							
C	Cr	W	Ni	V	Mo	Mn	Si
3,25; 3,60; 3,98; 4,14; 4,36; 4,74	18,3	0,28	0,31	0,32	0,45	0,47	0,35

Характер изменения микроструктуры всех трех видов образцов при литье в различные формы практически одинаковый (рис. 2). Размеры карбидов увеличиваются по мере увеличения количества углерода в сплаве. Интересующие нас заэвтектические сплавы с содержанием углерода 4,74% характеризуются большим количеством довольно крупных карбидов размерами до 100 мкм. При уменьшении содержания углерода до 3,98% большая часть карбидов имеет размеры до 30 мкм и небольшое количество – размеры 30–50 мкм.

С целью определения влияния углерода на динамику и кинетику затвердевания образцов проводили численные исследования процесса теплообмена при затвердевании с использованием ранее созданного программного комплекса [4].

Влияние содержания углерода в математической модели учитывали посредством введения соответствующего интервала кристаллизации сплава. Интервалы кристаллизации сплавов в зависимости от содержания углерода принимались на основании [1] (табл. 2).

Таблица 2. Интервалы кристаллизации сплавов ИЧХ18ВМ

Номер эксперимента N_3	Содержание углерода C, %	Интервал кристаллизации	
		температура солидус, °C	температура ликвидус, °C
1	3,25	1279	1280
2	3,60	1270	1280
3	3,98	1260	1370
4	4,14	1240	1400
5	4,36	1225	1430
6	4,74	1220	1440

В табл. 3–5 приведены результаты расчета динамики твердой фазы $\Psi_{ТВ}$, %, отливки в процессе ее затвердевания при условиях теплообмена в нижней части формы, соответствующих вариантам 1–3. В колонках 1–6 даны результаты для соответствующего содержания углерода в сплаве (см. табл. 2).

Таблица 3. Динамика твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, % (вариант 1)

$\tau, c / N_3$	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0
5	0,3	0	0	0	0	0
10	2,8	0,74	0	0	0	0
15	10,6	4,4	0	0	0	0
20	27	12,4	0	0	0	0
25	47	25,1	0	0	0	0
30	65,8	44	0	0	0	0
35	81,6	65,6	3,7	0	0	0
40	93,7	83,6	30,9	11	5,2	3,8
45	100	97,6	100	100	99,6	99
50		100			100	100

Таблица 4. Динамика твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, % (вариант 2)

$\tau, c / N_3$	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0
5	0,1	0	0	0	0	0
10	3,2	0,7	0	0	0	0
15	16,8	6,1	0	0	0	0
20	37,1	20,3	0	0	0	0
25	59,4	38,8	4,8	0	0	0
30	79	61,7	22	11,9	4,9	3,5
35	93,7	83,2	54,8	39,1	33,3	31,6
40	100	98,8	100	100	100	100

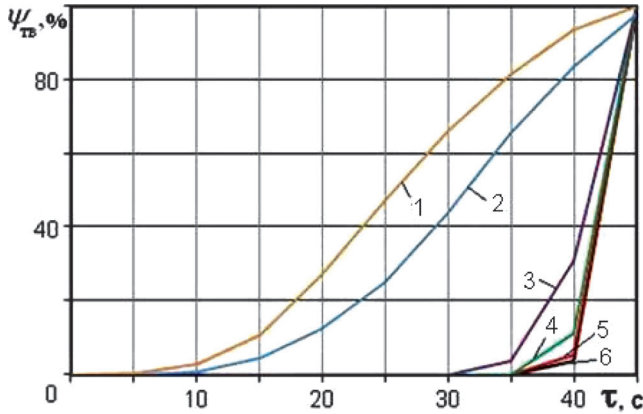


Рис. 3. Сравнение динамики твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, %, полученной в форме варианта 1: 1 – $C = 3,25\%$; 2 – $3,60$; 3 – $3,98$; 4 – $4,14$; 5 – $4,36$; 6 – $C = 4,74\%$

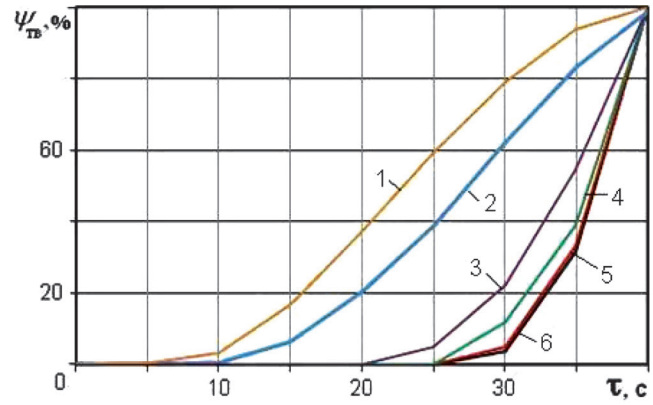


Рис. 4. Сравнение динамики твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, %, полученной в форме варианта 2. Обозначения те же, что на рис. 3

В табл. 5, колонках 1', 4' и 6' приведены результаты расчета при температуре заливки расплава в форму, равной $1450\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 5. Динамика твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, % (вариант 3)

$\tau, \text{c} / N_3$	1	1'	2	3	4	4'	5	6	6'
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,6	14,4	4,7	1,1	0	1,4	0	0	0
10	25,8	40,2	19,5	15,9	12	18	8,6	7,4	14,6
15	51,3	67,9	37,6	31,2	27	34,9	24,2	23,4	32,4
20	76,6	90,3	59,7	48,1	44,5	60,2	42,3	41,6	59,4
25	95,3	100	84,6	100	100	100	100	100	100
30	100		100						

На рис. 3 показаны зависимости, отражающие динамику твердой фазы отливок из сплава ИЧХ18ВМ с разным содержанием углерода при литье в форму из ХТС (вариант 1). Коэффициент контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью нижней части формы из ХТС $\alpha_{2,3}$ принимался равным $10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ исходя из наличия постоянного плотного теплового контакта.

Как видно из рисунка, динамика затвердевания сплавов, соответствующих кривым 4–6, в форме из ХТС примерно одинакова и отличается незначительно. Динамика затвердевания сплавов, соответствующих кривым 1–3, значительно отличается.

На рис. 4 представлены зависимости, отражающие динамику твердой фазы отливок из сплава ИЧХ18ВМ с разным содержанием углерода при литье в форму из ХТС с разделительным покрытием на стальном основании (вариант 2). Коэффициент контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью стальной плиты $\alpha_{2,3}$ принимался равным $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ исходя из толщины слоя покрытия и теплопроводности его материала.

Как видно из рисунка, для такой формы и такой интенсивности теплообмена в нижней ее части характерны те же особенности, что и для формы из ХТС.

На рис. 5 представлены зависимости, отражающие динамику твердой фазы при литье в форму из ХТС на окрашенном стальном основании (вариант 3). В этом случае коэффициент контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью стальной плиты $\alpha_{2,3}$ принимался равным $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ исходя из толщины слоя краски и ее теплопроводности.

Как видно из рисунка, при такой интенсивности теплообмена в нижней части формы динамика за-

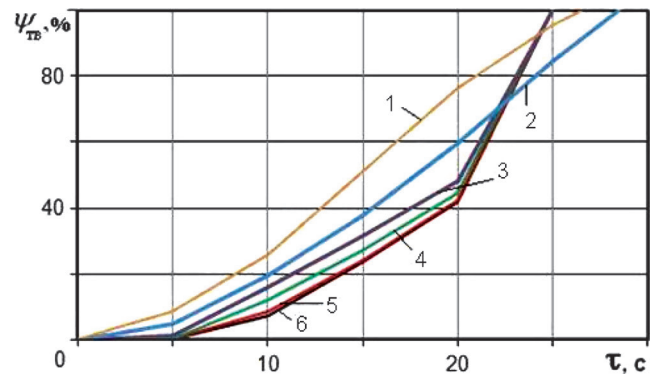


Рис. 5. Сравнение динамики твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, %, полученной в форме варианта 3. Обозначения те же, что на рис. 3

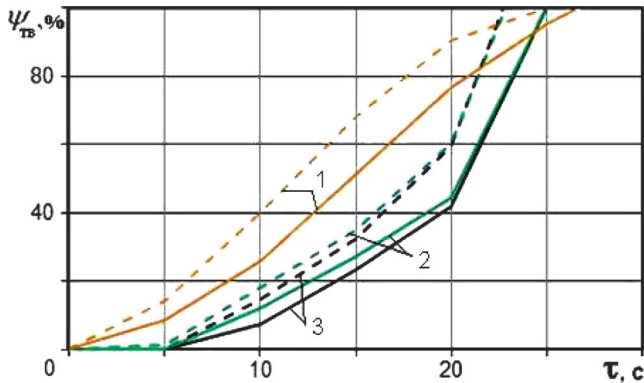


Рис. 6. Сравнение динамики твердой фазы отливки $\Psi_{ТВ}$, %, при различной температуре заливки (величине перегрева расплава): 1 – C = 3,25%; 2 – 4,14; 3 – C = 4,74%; сплошная – $T_{зал} = 1500$ °C; штриховая – $T_{зал} = 1450$ °C

твердевания отливок отличается в меньшей степени. Но отличия остаются значительными для чугунов с содержанием углерода 3,25 и 3,60% ($N_3 = 1, 2$).

На рис. 6 показаны зависимости, отражающие динамику твердой фазы при литье в форму из ХТС на окрашенном стальном основании при разных температурах заливки расплава (табл. 5). Наблюдается значительное отличие в динамике затвердевания рассматриваемых сплавов при содержании углерода 3,25, 4,14 и 4,74% независимо от величины перегрева расплава.

В табл. 6 для различных вариантов процесса затвердевания приведены продолжительность снятия перегрева расплава $\tau_{пер}$, с, продолжительность затвердевания отливки τ_3 , с, и среднеинтегральная по поперечному сечению отливки температура в момент ее полного затвердевания $T_{ср.з}$, °C.

Таблица 6. Результаты расчета времени перегрева, продолжительности затвердевания отливки и среднеинтегральной температуры по поперечному сечению отливки в момент ее полного затвердевания для разных вариантов форм (теплообмена)

N_3	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	$\tau_{пер}$, с	τ_3 , с	$T_{ср.з}$, °C	$\tau_{пер}$, с	τ_3 , с	$T_{ср.з}$, °C	$\tau_{пер}$, с	τ_3 , с	$T_{ср.з}$, °C
1	43,3	44,3	1221	37,7	38,8	1201	26,6	27,6	1126
2	41,1	46	1222	35,5	40,4	1202	25,2	29,3	1127
3	14,7	43	1243	14,7	37	1226	12,4	25,3	1158
4	11,3	44,3	1225	11,4	37,9	1210	10	25,3	1147
5	8,6	45	1211	8,8	38,3	1197	7,8	25,2	1137
6	7,8	45,3	1206	7,9	38,5	1192	7,1	25,3	1134

Как видно из рис. 7, время снятия перегрева $\tau_{пер}$ при затвердевании сплавов, соответствующих $N_3 = 4, 5, 6$, во всех вариантах отличается незначительно, чего не скажешь о затвердевании сплавов, соответствующих $N_3 = 1, 2, 3$.

Кроме того, существенны отличия по времени полного затвердевания τ_3 для разных вариантов форм. Но изменение содержания углерода незначительно сказывается на τ_3 , что характерно для каждой из

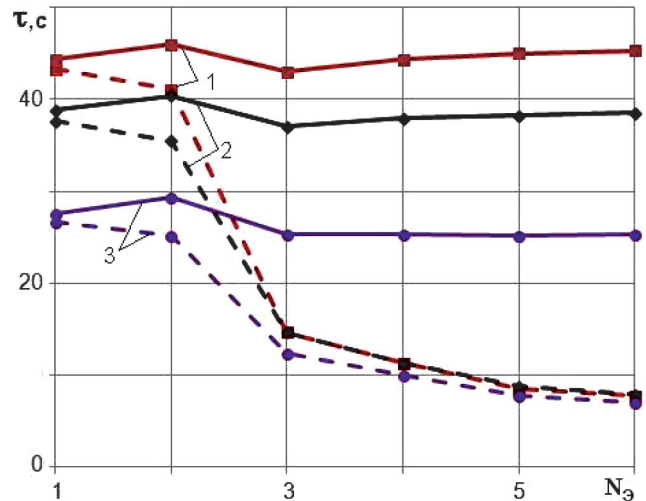


Рис. 7. Сравнение продолжительности затвердевания отливки (сплошная) и снятия перегрева расплава (штриховая) для разных вариантов теплообмена: 1 – вариант формы 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3

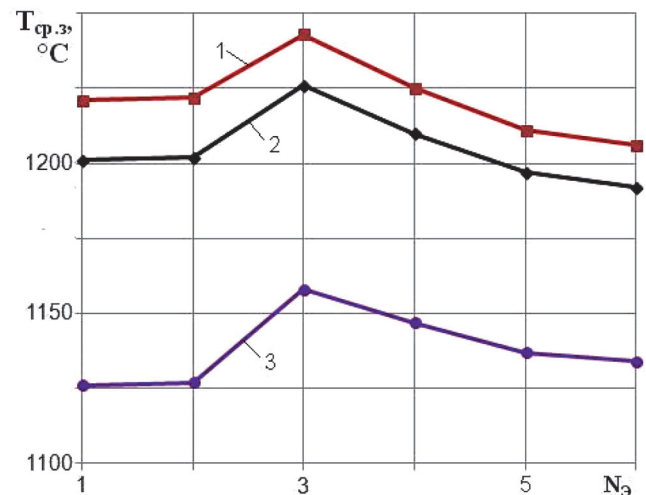


Рис. 8. Сравнение среднеинтегральных температур в сечении отливки для разных вариантов теплообмена: 1 – вариант формы 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3

форм. В наибольшей степени проявляется влияние углерода на продолжительность снятия перегрева расплава, особенно при изменении C от 3,60 до 3,98%.

Наблюдается существенная разница в среднеинтегральных температурах отливки в ее сечении $T_{\text{ср.з}}$ к моменту полного затвердевания для разных вариантов форм (рис. 8). Эта разница достигает 95 °С при содержании углерода 3,25% и 72 °С при $C = 4,74\%$.

Изменение содержания углерода в меньшей степени сказывается на величине $T_{\text{ср.з}}$. Максимальная разница в значениях $T_{\text{ср.з}}$ достигает 37 °С при изменении количества углерода от 3,60 до 3,98%.

Выводы

Установлено, что изменение содержания углерода в сплаве ИЧХ18ВМ может оказывать значительное влияние на процесс затвердевания отливок для каждого из рассмотренных вариантов форм.

В наибольшей степени изменение содержания углерода влияет на динамику затвердевания отливки и продолжительность снятия перегрева расплава.

Установлено, что влияние количества углерода в сплаве ИЧХ18ВМ на динамику затвердевания отливки меньше при литье по варианту 3 – в форму из ХТС на окрашенном стальном основании.

Результаты исследований использованы для изготовления деталей дробильно-размольного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гарбер М. Е.** Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
2. **Нетребко В. В.** Влияние химического состава высокохромистых чугунов на обрабатываемость резанием // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. № 1 (61). С. 122–128.
3. **Колокольцев В. М., Молочков П. П., Воробьев Б. С., Мурахтин А. В., Воронков Б. В.** Повышение эксплуатационных свойств отливок деталей центробежных насосов // Литейное производство. 2014. № 1. С. 14–18.
4. **Барановский Э. Ф., Пумпур В. А., Ильюшенко В. М., Барановский К. Э.** Затвердевание отливок из износостойких чугунов при литье в кокиль, песчаную и комбинированные формы // Литейное производство. 2011. № 2. С. 19–23.

REFERENCES

1. **Garber M. E.** *Iznosostoykie belye chuguny: svoystva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white cast iron: properties, structure, technology, operation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 280 p.
2. **Netrebko V. V.** Vliyanie himicheskogo sostava vysokhromistykh chugunov na obrabatyvaemost rezaniem [Influence of the chemical composition of high-chromium iron on machinability by cutting]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu = Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2016, no. 1 (61), pp. 122–128.
3. **Kolokolcev V. M., Molochkov P. P., Vorobyov B. S., Murahtin A. V., Voronkov B. V.** Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv otlivok detaley tsentrobezhnykh nasosov [Increase of operational properties of castings of parts of centrifugal pumps]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 2014, no. 1, pp. 14–18.
4. **Baranovsky E. F., Pumpur V. A., Ilyushenko V. M., Baranovsky K. E.** Zatverdevanie otlivok iz iznosostoykikh chugunov pri litje v kokil, peschanuyu i kombinirovannuyu formy [Solidification of castings made of wear-resistant cast iron in the casting mold casting, sand and combined forms]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 2011, no. 2, pp. 19–23.