

УДК 621.74:669.131.7

Хрычиков В. Е., Белый А. П., Меняйло Е. В., Маркелова Д. В.

**АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ LVMFLOW К ПРОЦЕССУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЧУГУННОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА**

Формирование горячих трещин, напряжений, усадочных раковин, пористости и других дефектов происходит при затвердевании отливки. Поэтому установление влияния конструкции и материала литейной формы на процесс затвердевания отливок является важной научной и практической задачей.

В первом приближении толщину затвердевшего слоя металла плоской полубесконечной отливки можно рассчитать [1, 2] по известному уравнению квадратного корня  $X = k\sqrt{\tau}$ . Величина  $k$  представляет собой корень сложного трансцендентного уравнения и зависит от множества факторов, характеризующих процесс затвердевания, термофизических коэффициентов материала отливки и литейной формы, температуры перегрева, затвердевания и др. Трудность определения величины  $k$  из трансцендентного уравнения заставила исследователей в области литейного производства определять её опытным путем, используя методы замера температуры в отливке и выливания расплава из форм, выполненных из различных материалов [3].

Реальная отливка имеет сложную 3-х мерную конфигурацию, фронт затвердевания только в отдельных частных случаях является плоским, теплофизические коэффициенты изменяются с уменьшением температуры, сложно учесть влияние литниковой системы и скорости заполнения расплавом формы, наличие холодильников, покрытий, утеплителей и т. д. Для решения такого класса задач применяют: метод Фурье, метод конечных интегральных преобразований, операционный метод, метод функций Грина, метод конечных разностей и метод конечных элементов. Для прикладных расчетов затвердевания отливок наибольшее распространение получил метод конечных интегральных преобразований, в котором искомое решение, удовлетворяет не уравнению теплопроводности, а интегралу теплового баланса (метод А. И. Вейника, метод Т. Гудмена). В вариационных методах также используется идея конечной глубины проникновения теплового возмущения и заданная наперед форма решения. Однако наиболее точные и полные решения сложных задач можно получить, применяя численные методы расчета, основанные на конечно-разностных схемах, что позволяет использовать ПК.

Современные программы компьютерного моделирования позволяют имитировать процессы, происходящие при заполнении расплавом формы, кристаллизации многокомпонентного сплава, образовании усадочных дефектов, рассчитывать напряжения в отливке. Наиболее известны системы ProCast, AFSolid (SolidCast) – США; Полигон, LVMFlow (NovaFlow) – Россия; Magma, Sitest (WinCast) – Германия; Simulor (Pamcast) – Франция; CastCAE – Финляндия. Программы различаются функциональными возможностями и типом генерируемой сетки – способом разбиения геометрической модели на элементарные объемы. Наиболее удобной и простой для пользователя является программа LVMFlow. Кроме того, все разработчики программ предоставляют базы данных по литейным сплавам и материалам литейной формы, холодильникам и т.п.

Однако эти данные не учитывают всего множества теплофизических процессов, возникающих при фазовых переходах сплава из жидкого в твердое состояние, особенностей теплообмена в литейной форме и на граничных поверхностях. Поэтому точность результатов расчета во многом зависит от адаптации модели к реальным процессам затвердевания сплава, полученным чаще всего с помощью экспериментальных термографических исследований.

Цель работы – адаптация модели LVMFlow к процессу затвердевания прокатного вала из высокопрочного чугуна.

Экспериментальные исследования процессов затвердевания проводили с помощью термопар на прокатном валке массой  $\sim 2200$  кг из высокопрочного чугуна масс. %: С – 3,10; Si – 1,41; Mn – 0,58; P – 0,214; S – 0,010; Cr – 0,34; Ni – 0,91;  $M_{\text{гост}} - 0,03$ . Анализ экспериментальных кривых охлаждения №№ 1, 2, 3, 4 (рис. 1) бочки валка  $\text{Ø}450$  мм показал, что чугун, залитый при температуре  $\sim 1320$  °С, практически не имеет, в соответствии с классической схемой [1, 2], перегрева расплава в форме. Это обусловлено тем, что заполнение формы осуществляется через сифонную литниковую систему с тангенциальным подводом питателя. При интенсивном вращении металла теплота перегрева теряется сначала в песчаноглинистой форме нижней шейки, затем в кокильной форме бочки, а далее в песчаноглинистых формах верхней шейки и прибыли  $\text{Ø}330$  мм. Поэтому уже через 3 мин. температура расплава уменьшается на 90 °С – с 1320 °С до 1230 °С.

Термопара № 1, установленная в осевой зоне отливки (см. рис. 1), показывает температуру эвтектической кристаллизации до  $\sim 1115$  °С у чугуна, модифицированного магнием. Такое понижение температуры по сравнению со значениями, приведенными на диаграмме состояния Fe–С, обусловлено спецификой литья валков в кокильной форме, переохлаждением расплава и повышенным содержанием фосфора и магния [3]. Общая продолжительность затвердевания валка составляет  $\sim 80$  мин. Причём, наблюдается ускоренное продвижение фронта затвердевания в поверхностной зоне на глубину до 20...40 мм и в осевой зоне – 160...225 мм.

Моделирование процесса затвердевания прокатного валка с помощью пакета LVMFlow проводили стандартными методами: после ввода исходных данных и расчета, сопоставляли общую продолжительность затвердевания бочки валка  $\text{Ø}450$  мм с результатами экспериментального замера. При моделировании исходные значения вводили из базы данных по литейным сплавам и материалам литейной формы, имеющихся в пакета LVMFlow. Результаты моделирования приведены на рис. 1 – кривые охлаждения виртуальных термопар № 5, 6, 7 и 8 соответствуют точкам экспериментального замера хромель-алюмелевых термопар №№ 1, 2, 3 и 4, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля.

Для объективной оценки точности описания анализируемых экспериментальных кривых (1–4 на рис. 1) и расчетных (5–8 на рис. 1) посчитывали погрешности температуры на 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90 минутах затвердевания отливки (табл. 1).

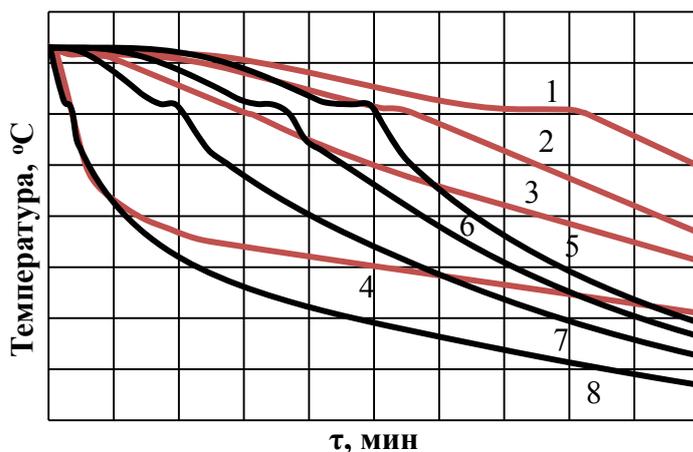


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные кривые затвердевания в радиальном направлении бочки валка диаметром 450 мм из высокопрочного чугуна:

1, 2, 3, 4 – экспериментальные кривые охлаждения, полученные с помощью термопар, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля; 5, 6, 7, 8 – расчетные кривые охлаждения, полученные с помощью исходных данных по литейным сплавам, используемых в LVMFlow

Таблица 1

Результаты анализа погрешности экспериментальных  $T_{Э}$  и расчетных  $T_{Р}$  данных, полученных с термопар, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля

Время, мин	$T_{Э17}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р17}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э90}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р90}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э150}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р150}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э225}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р225}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %
5	1031	1029	0,17	1218	1222	0,31	1222	1230	0,65	1222	1230	0,65
10	933	927	0,64	1208	1183	2,09	1217	1225	0,62	1220	1230	0,82
20	869	820	5,68	1156	1111	3,86	1207	1186	1,74	1219	1220	0,12
30	841	762	9,41	1103	980	11,21	1180	1126	4,60	1206	1189	1,38
40	822	722	12,22	1049	903	13,96	1147	1045	8,89	1181	1135	3,86
50	804	691	14,07	1000	841	15,92	1115	962	13,71	1153	1106	4,09
60	786	664	15,53	958	786	18,00	1080	880	18,53	1127	952	15,50
70	768	638	16,89	922	737	20,06	1027	809	21,21	1110	862	22,35
80	749	613	18,15	885	694	21,56	973	752	22,74	1108	792	28,53
90	731	590	19,24	849	658	22,53	920	704	23,48	1057	736	30,36

Результаты анализа погрешности экспериментальных  $T_{Э}$  и расчетных  $T_{Р}$  данных, полученных с термопар, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля, показали, что максимальные погрешности составляют от 19,24 до 30,36 %. Вследствие этого использовать результаты моделирования в затвердевания отливок из высокопрочного чугуна в практических целях неприемлемо.

Для повышения точности моделирования корректировали теплофизические свойства сплава. После адаптации экспериментальных замеров в модели LVMFlow расчетные кривые охлаждения в точках 5, 6, 7, 8 на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля представлены на рис. 2. Результаты анализа погрешности экспериментальных  $T_{Э}$  и расчетных  $T_{Р}$  данных представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа погрешности экспериментальных  $T_{Э}$  и расчетных  $T_{Р}$  данных, полученных после корректировки теплофизических свойств высокопрочного чугуна

Время, мин	$T_{Э17}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р17}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э90}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р90}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э150}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р150}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %	$T_{Э225}, ^\circ\text{C}$	$T_{Р225}, ^\circ\text{C}$	Погрешность, %
5	1031	1078	4,53	1218	1228	0,82	1222	1230	0,65	1222	1230	0,65
10	933	964	3,33	1208	1214	0,48	1217	1230	1,03	1220	1229	0,74
20	869	858	1,32	1156	1154	0,15	1207	1220	1,08	1219	1229	0,86
30	841	803	4,51	1103	1109	0,52	1180	1194	1,17	1206	1224	1,52
40	822	769	6,51	1049	1021	2,70	1147	1159	1,05	1181	1211	2,58
50	804	745	7,39	1000	969	3,07	1115	1120	0,46	1153	1189	3,10
60	786	726	7,64	958	925	3,48	1080	1083	0,27	1127	1158	2,78
70	768	710	7,55	922	888	3,66	1027	1027	0,02	1110	1124	1,25
80	749	695	7,26	885	856	3,30	973	981	0,78	1108	1114	0,52
90	731	681	6,84	849	826	2,70	920	937	1,85	1057	1029	2,64

Результаты анализа максимальных погрешностей расчетных кривых охлаждения, полученных с помощью исходных теплофизических значений (1 на рис. 3) и после корректировки (2 на рис. 3) показали, что адаптация модели LVMFlow позволяет уменьшить погрешность расчета с 19,24...30,36 % до 1,85...6,84 %. Поэтому полученные значения теплофизических характеристик пригодны для ввода в систему моделирования и могут быть использованы при расчетах новых конструкций литейных форм прокатных валков из высокопрочного чугуна.

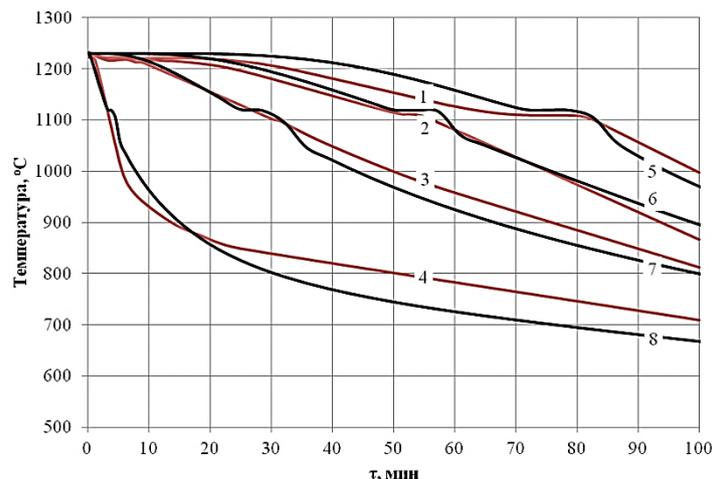


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные кривые затвердевания в радиальном направлении бочки валка диаметром 450 мм из высокопрочного чугуна:

1, 2, 3, 4 – экспериментальные кривые охлаждения, полученные с помощью термопар, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм соответственно от внутренней поверхности кокиля; 5, 6, 7, 8 – расчетные кривые охлаждения, полученные после корректировки теплофизических свойств высокопрочного чугуна

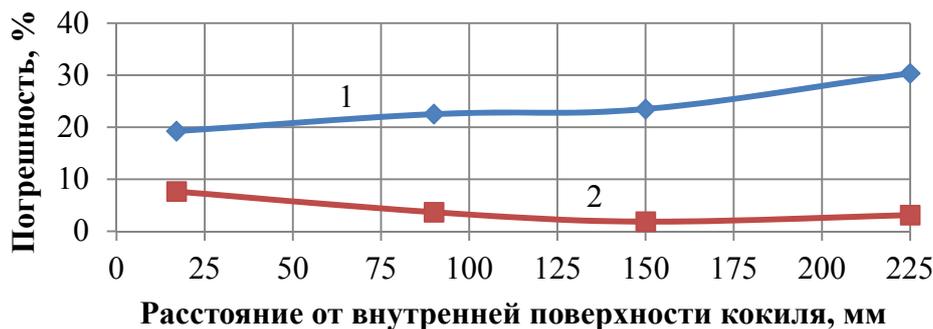


Рис. 3. Результаты анализа максимальных погрешностей расчетных кривых охлаждения, полученных с помощью исходных теплофизических значений (1) и после корректировки (2)

### ВЫВОДЫ

Проведен анализ экспериментальных и расчетных кривых охлаждения, полученных с помощью пакета LVMFlow. Установлено, что использование исходных значений теплофизических свойств высокопрочного чугуна пакета LVMFlow дает высокую погрешность (19,24–30,36 %) по сравнению с экспериментальными результатами.

Корректировка теплофизических свойств высокопрочного чугуна для пакета LVMFlow позволила уменьшить погрешность расчета до 1,85–6,84 %. Полученные значения теплофизических характеристик высокопрочного чугуна могут быть использованы при расчетах новых конструкций литейных форм прокатных валков.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Б. Б. *Литейные процессы* / Б. Б. Гуляев. – М.; Л. : Машигиз, 1960. – 416 с.
2. Хворинов Н. М. *Затвердевание отливок* / Н. М. Хворинов; пер. с чеш. – М. : ИЛ, 1955. – 140 с.
3. *Затвердевание металлов и металлических композиций. Учебник для вузов* / Лейбензон В. А., Плющенко В. Л., Кондратенко В. М. и др. – Киев : Наукова думка, 2009. – 410 с.

Статья поступила в редакцию 03.11.2011 г.