

In the article there is presented the program complex "LENTA" for modeling of the armored chlorine-copper tape at continuous casting into rolling crystallizer. There are described the possibilities of the software support and form of representation of the calculation results.

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ПУМПУР, В. М. ИЛЮШЕНКО,
Институт технологии металлов НАН Беларуси

УДК 669.18.046:519

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС "ЛЕНТА" ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕНТЫ, АРМИРОВАННОЙ СЕТКОЙ

Технология изготовления катодов водоактивируемых батарей посредством непрерывного литья в валковый кристаллизатор ленточной заготовки из сплава солей на основе хлористой меди нашла спрос на внутреннем и внешнем рынках. Особенность этой технологии в том, что при литье армированной ленты формирование отливки происходит путем намораживания расплава на поверхности кристаллизатора и армирующей сетке. Затвердевающие корки соединяются с арматурой, на выходе из валков образуется единый композиционный материал. В отливке в момент ее прохождения через горизонтальную ось валков должно содержаться некоторое количество жидкой фазы.

Для исследования комплекса одновременно протекающих процессов намораживания рассматривали плоскую медную ленту, масса 1 м^2 которой соответствует массе 1 м^2 сетки. Исходя из известной массы 1 м^2 медной сетки с диаметром проволочек $d = 150 \text{ мкм}$ ($m = 0,42 \text{ кг}$), толщина эквивалентной сетки δ_c составила 54 мкм .

В ИТМ НАН Беларуси разработан комплекс программных средств "ЛЕНТА", который позволяет смоделировать процесс формирования хлористо-медной ленты при варьировании значений множества параметров литья [1, 2], прежде всего таких, как:

- интенсивность контактного теплообмена между формирующейся отливкой и поверхностью валкового кристаллизатора α_k ;
- интенсивность охлаждения внутренней поверхности валков водой α_b ;
- начальная температура заливаемого расплава T_{01} , валков T_{02} и медной сетки T_{03} ;
- скорость вращения валков (скорость литья) V ;
- глубина ванны с расплавом в зеве валков H ;
- толщина стенки валков δ_b и их диаметр D ;

- толщина хлористо-медной ленты δ ;
- толщина эквивалентной сетки медной ленты δ_c .

Численную реализацию математической модели процесса литья хлористо-медной ленты осуществляли на основе метода конечных разностей. Программный комплекс разработан с современным интерфейсом под Windows. Исходные данные вводили с помощью двух диалоговых окон, последовательно появляющихся на экране. В первом окне (рис. 1), кроме компонентов для ввода данных, представлена схема формирования ленточной заготовки.

Во втором диалоговом окне (рис. 2) можно ввести исходные данные, осуществить выполнение программы, просмотреть и вывести на печать результаты расчетов, получить полную справочную информацию по программному комплексу "ЛЕНТА", используя пункты меню и "быстрые" кнопки на панели окна.

Программный комплекс оснащен системой оперативных подсказок на случай неверных действий пользователя. Кроме того, на экран монитора выводятся сообщения в случае, если процесс литья является неприемлемым, т. е. когда отливка полностью затвердевает к моменту выхода из зева валков, или ненадежным, если жидкой фазы в отливке к моменту выхода слишком мало.

Результатами выполнения программы на стадии затвердевания отливки в ванне с расплавом (см. рис. 1, зона Л) являются:

- температура поверхностей отливки и валка, температура в центре медной сетки, $^{\circ}\text{C}$;
- толщина твердой, жидкой и твердо-жидкой фаз, формирующихся на валке и медной сетке, эффективная толщина жидкой и твердой фаз, мм;
- относительное количество (доля) твердой, жидкой и твердо-жидкой фаз, образующихся на валке и медной сетке, эффективная доля жидкой и твердой фаз, %.

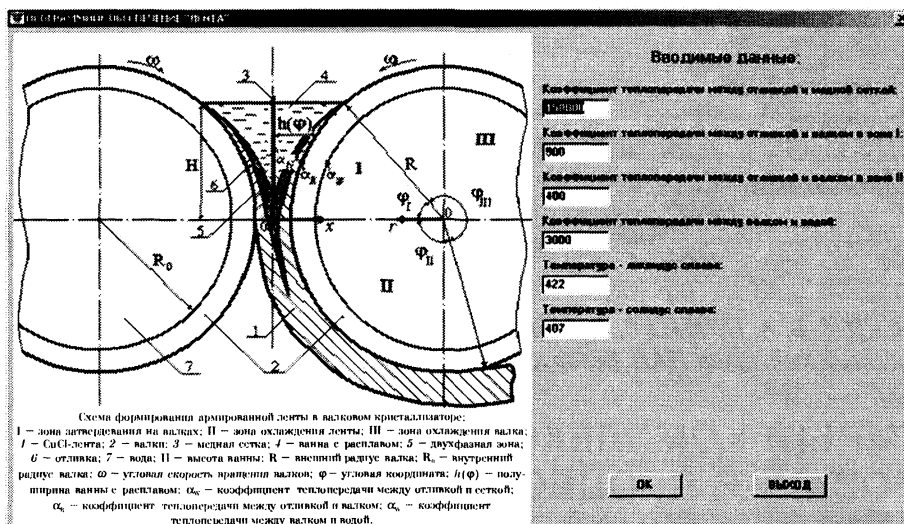


Рис. 1. Первое диалоговое окно программы

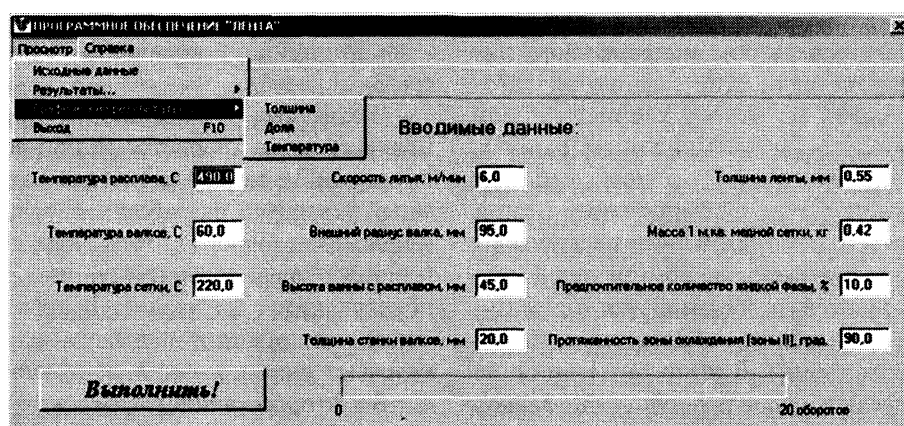


Рис. 2. Второе диалоговое окно программы

Результатами выполнения программы на стадии охлаждения ленты на одном из валков (см. рис. 1, зона II) при $\varphi_n = 90^\circ$ являются:

- температура отливки на поверхностях контакта с медной сеткой, валком и воздухом, а также температура медной сетки и на поверхности валка;

- эффективная толщина твердой фазы, а также толщина твердо-жидкой фазы, мм;

- эффективная доля твердой фазы и доля твердо-жидкой фазы в формирующейся отливке, %.

Результатами выполнения программы на стадии охлаждения ленты в зоне II при $\varphi_n > 90^\circ$ являются:

- температура отливки на ее поверхностях;
- температура поверхности валка.

Результатами выполнения программы на стадии охлаждения валка на воздухе (см. рис. 1, зона III) являются температура на внутренней (водоохлаждаемой) и наружной поверхностях валка.

Доля твердой (жидкой, твердо-жидкой) фазы в рассматриваемом сечении ванны с расплавом – это отношение толщины твердой (жидкой, твердо-жидкой) фазы к половине ширины ванны, измеряемое в процентах. Под эффективной долей

жидкой фазы отливки подразумевается суммарная доля расплава и доля жидкой фазы в двухфазной зоне, под эффективной долей твердой фазы – суммарная доля затвердевшей части отливки (корки) и доля твердой фазы в двухфазной зоне. Эффективная толщина жидкой фазы отливки состоит из толщины расплава и толщины жидкой фазы в двухфазной зоне, эффективная толщина твердой фазы – из толщины затвердевшей части отливки и толщины твердой фазы в двухфазной зоне.

Результаты расчетов выводятся как в табличном, так и в графическом виде, что позволяет проводить их эффективный и удобный анализ для различных вариантов. На рис. 3 представлен пример вывода результатов расчета в табличной форме.

В графическом виде выводятся результаты для первой стадии формирования отливки – стадии затвердевания на валках-кристаллизаторах в зоне I. Например, на экран выводятся графические зависимости, отражающие изменение во времени доли корки на валке, эффективной доли твердой и жидкой фаз, доли твердо-жидкой фазы, образующихся на валке и медной сетке в сечении ванны (рис. 4).

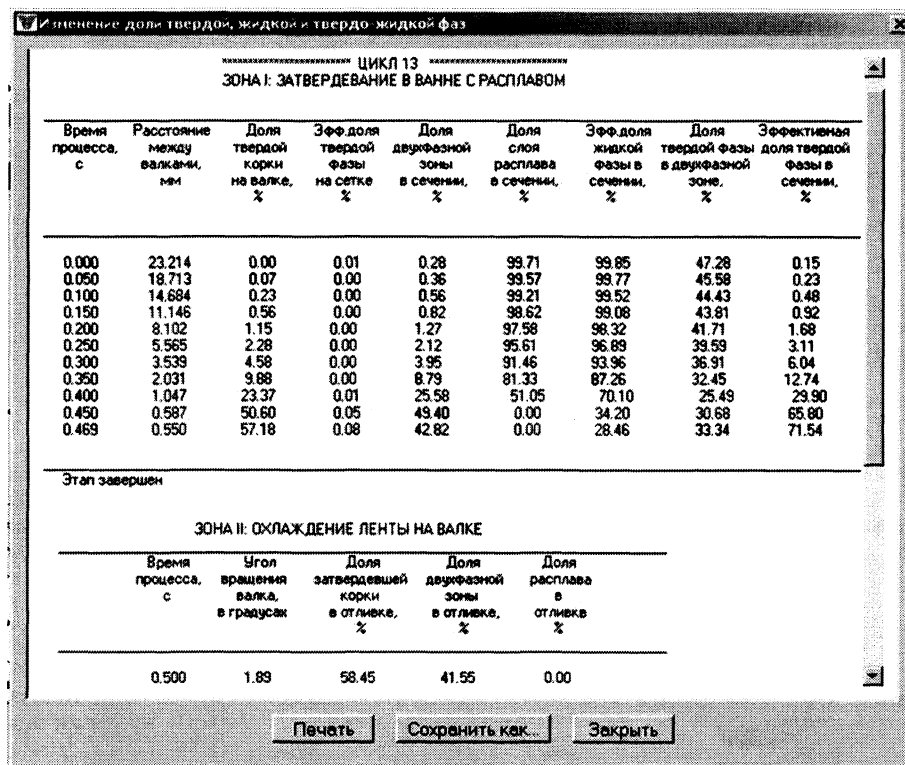


Рис. 3. Пример представления результатов расчета в табличной форме

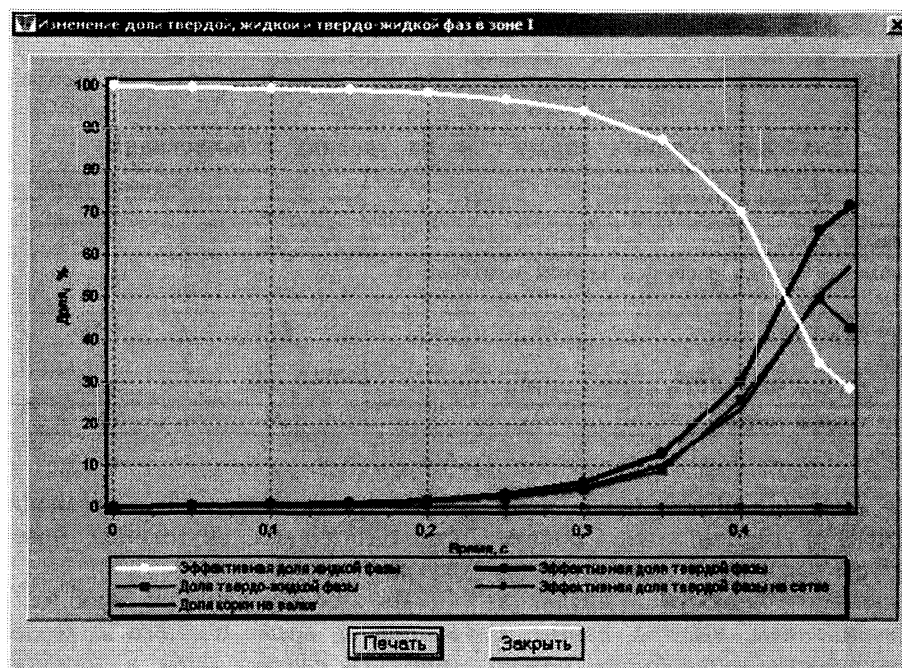


Рис. 4. Пример представления результатов расчета в графической форме

Кроме того, выводится изображение динамики затвердевания отливки в нижней части ванны с расплавом. Высота этой части ванны составляет примерно 1/3 высоты всей ванны (рис. 5).

В случае нормального завершения программы на экран выводится сообщение о времени выхода процесса литья на устойчивый режим работы, а также о времени полного затвердевания отливки.

Тестирование программы осуществляли на основе анализа зависимости эффективной доли

жидкой фазы в отливке в момент τ_1 выхода ее из ванны с расплавом в зону II от основных параметров литья. Численные эксперименты проводили при варьировании значений одного из параметров на трех уровнях и при фиксированных значениях остальных на среднем уровне (кроме начальной температуры медной сетки, величина которой фиксировалась на верхнем уровне варьирования, т. е. принималась равной 220 °С). Значения параметров на каждом из уровней приведены в таблице.

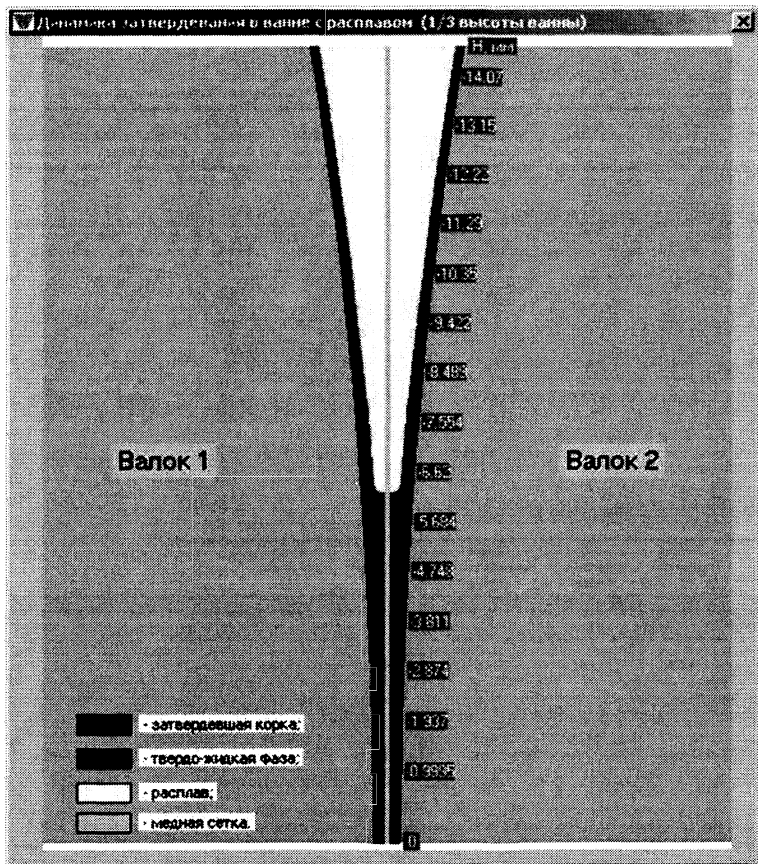


Рис. 5. Представление динамики формирования отливки в нижней части ванны с расплавом

Значения входных параметров на уровнях варьирования

Входной параметр	Значения параметра		
	1-й	2-й	3-й
Высота ванны с расплавом H , мм	45	50	55
Коэффициент теплообмена между растущей коркой и валком α_k , Вт/(м ² · К)	700	800	900
Начальная температура расплава T_{01} , °С	460	490	520
Скорость литья V , м/мин	5	6	7
Коэффициент теплообмена между валком и водой α_B , Вт/(м ² · К)	2000	3000	3500
Начальная температура медной сетки T_{03} , °С	20	120	220

Как видно из рис. 6, эффективная доля жидкой фазы в момент τ_1 увеличивается с ростом начальной температуры расплава и медной сетки, а также с повышением скорости литья, а уменьшается с увеличением высоты ванны с расплавом, интенсивности теплообмена между растущей коркой и поверхностью валка в зоне I, а также с увеличением интенсивности охлаждения внутренней поверхности валка водой. Это полностью соответствует реальным условиям литья армированной хлористо-медной ленты в валковый кристаллизатор.

Наибольшее влияние на количество жидкой фазы в отливке оказывают изменение начальной температуры расплава, скорости литья, высоты ванны с расплавом и интенсивности теплообмена между коркой и валком, в меньшей степени влияет изменение начальной температуры медной

сетки, а в наименьшей – изменение интенсивности охлаждения внутренней поверхности валка водой.

Из анализа влияния этих же входных параметров на время полного затвердевания отливки (рис. 7) следует, что в наибольшей степени влияют начальная температура расплава и интенсивность теплообмена между коркой и валком, в меньшей степени – начальная температура медной сетки и высота ванны с расплавом, а в наименьшей – скорость литья и интенсивность охлаждения валка водой. Эти выводы также подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Таким образом, разработанный программный комплекс “ЛЕНТА” может быть использован для определения оптимальных режимов литья ленточных заготовок различной толщины.

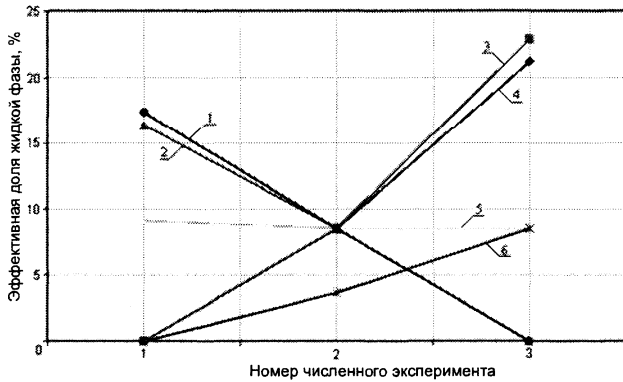


Рис. 6. Изменение эффективной доли жидкой фазы в зависимости от входных параметров: 1 – высоты ванны с расплавом; 2 – интенсивности теплообмена растущей корки с валком; 3 – начальной температуры расплава; 4 – скорости литья; 5 – интенсивности охлаждения валка водой; 6 – начальной температуры медной сетки

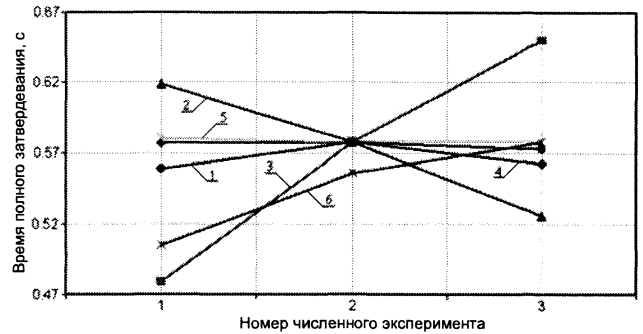


Рис. 7. Изменение времени полного затвердевания отливки в зависимости от входных параметров: 1 – высоты ванны с расплавом; 2 – интенсивности теплообмена растущей корки с валком; 3 – начальной температуры расплава; 4 – скорости литья; 5 – интенсивности охлаждения валка водой; 6 – начальной температуры медной сетки

Литература

1. Анисович Г.А., Барановский Э.Ф., Леонов В.Н и др. Теоретическое исследование формирования армированной ленты из хлористой меди при непрерывном литье в валковый кристаллизатор // Исследования в области

электрохимической энергетики: Сб. науч. тр. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С. 118–124.

2. Барановский Э.Ф., Ильюшенко В.М., Пумпур В.А. Математическое моделирование процесса формирования армированной хлористо-медной ленты // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 17–19.