

Виконано моделювання процесу затвердіння при безперервному вертикальному (вниз) лиття срібла в закритий графітовий формоутворювач з мідною водоохолоджуваною сорочкою. Показано особливості відведення тепла при безперервному литті металів з високою теплопровідністю

Ключові слова: литво, срібло, моделювання, теплопередача

Выполнено моделирование процесса затвердевания при непрерывном вертикальном (вниз) литье серебра в закрытый графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой. Показаны особенности отвода тепла при непрерывном литье металлов с высокой теплопроводностью

Ключевые слова: литье, серебро, моделирование, теплопередача

The process modeling of solidification during continuous vertical casting of silver in a closed graphite shaper with a water-cooled copper shell is executed. The features of heat removal during continuous casting of metals with high thermal conductivity are shown.

Keywords: casting, silver, modeling, heat transfer

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СЕРЕБРА В ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГРАФИТОВЫЙ ФОРМООБРАЗОВАТЕЛЬ

Е. Ю. Кушнерова
Ассистент*

Н. А. Маняк
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

И. Ф. Червоний
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
Кафедра металлургии и цветных металлов
Запорожская государственная инженерная академия
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006
Контактный тел.: (061) 223-82-61, 050-637-01-21
E-mail: rot44@yandex.ru

В. Н. Бредихин
Кандидат технических наук, профессор
*Кафедра цветных металлов и конструкционных материалов
Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001

1. Введение

Установки непрерывного литья получили широкое распространение по ряду преимуществ особенно по сравнению с методами «циклического» литья. Однако технология непрерывного литья различных металлов (сплавов) имеют существенные отличия, в первую очередь из-за физических свойств отливаемого металла (сплава) и, как следствие, различных теплофизических процессов протекающих в зоне кристаллизатора.

Формирование заготовки при непрерывном стоп-стартовом режиме литья в вертикальный графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой имеет особенности теплосъема, макро- и микроструктуры, и соответственно, механические свойства отливаемой заготовки из серебра.

Для анализа особенностей теплосъема, макро- и микроструктуры, механических свойств серебряной заготовки требуется понимание процессов протекаю-

щих в зоне ее формирования в кристаллизаторе, где происходит фазовый переход – жидкого металла в твердый [1, 2, 3].

2. Постановка задачи

Задачей данной работы являлось разработка модели формирования серебряной заготовки при непрерывном литье в вертикальный закрытый графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой - кристаллизатор.

3. Основная часть исследований

Расчетная схема теплового состояния металла в кристаллизаторе приведена на рисунке 1.

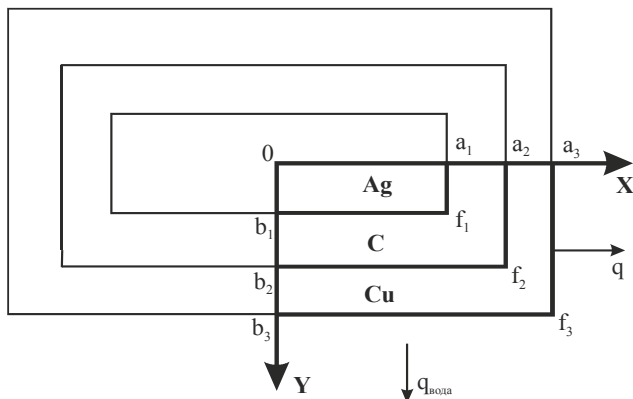
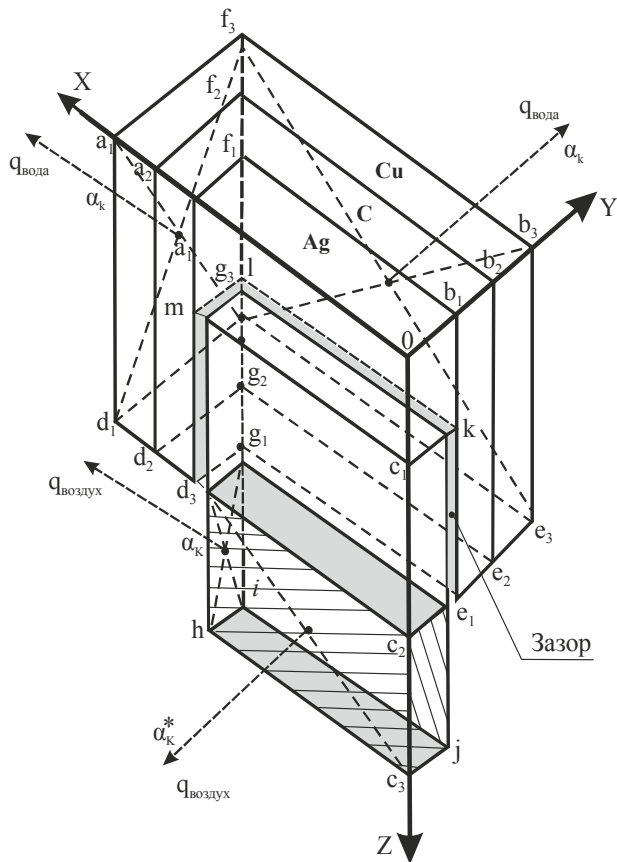


Рис. 1. Расчетная схема теплового состояния серебряной заготовки в графитовом формообразователе с медной водоохлаждаемой рубашкой

Тепловое состояние системы «металл-кристаллизатор» с учетом эффекта перемещения массы металла вдоль оси кристаллизатора можно описать следующей системой дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности: в металле:

$$C_1 \rho_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \tau} + w_z \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + \rho_1 L \frac{\partial \psi}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где C_1 – теплоемкость металла, Дж/(кг×град);
 ρ_1 – плотность металла, кг/м³;

w_z – скорость движения металла вдоль оси кристаллизатора, м/с;
 L – удельная теплота плавления (кристаллизации), Дж/кг;
 λ_1 – теплопроводность металла, Вт/(м×К);
 $\frac{\partial \psi}{\partial \tau}$ – скорость нарастания твердой фазы:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{V_{ТВ}}{V_0} \right); \quad \psi = \frac{V_{ТВ}}{V_0}, \quad (2)$$

где ψ – относительное количество твердой фазы в рассматриваемом элементе расплава;
 $V_{ТВ}$ – суммарный объем твердой фазы в рассматриваемом элементе переохлажденного расплава;
 V_0 – рассматриваемый элементарный объем.

в графитовом формообразователе:

$$C_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right). \quad (3)$$

в стенке медной водоохлаждаемой рубашки:

$$C_3 \rho_3 \left(\frac{\partial T_3}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \right). \quad (4)$$

Система уравнений (1)-(4) дополняется следующими граничными условиями:

граничные условия: предполагая симметричность температурного поля в системе «металл-кристаллизатор» граничные условия в плоскостях xz и yz можно записать следующим образом:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq a_1; 0 \leq z \leq c_3, \quad (5)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \text{при } a_1 \leq x \leq a_2; 0 \leq z \leq c_2, \quad (6)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \text{при } a_2 \leq x \leq a_3; 0 \leq z \leq c_2, \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \text{при } 0 \leq y \leq b_1; 0 \leq z \leq c_3, \quad (8)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \text{при } b_1 \leq y \leq b_2; 0 \leq z \leq c_2, \quad (9)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \text{при } b_2 \leq y \leq b_3; 0 \leq z \leq c_2, \quad (10)$$

Граничное условие в плоскости $ezjh$ фактически не задается.

Граничные условия в плоскости xy :

– в области $0a_1f_1b_1$ задано граничное условие I рода:

$$T_1 = T_{\text{расплава}}; 0 \leq x \leq a_1; 0 \leq y \leq b_1; z = 0, \quad (11)$$

– в области $a_1a_3f_3b_3b_1f_1$ для **C**- графита и **Cu**- меди, соответственно:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (12)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (13)$$

в области $d_1 d_3 g_3 e_3 e_1 g_1$ для **C**- графита и **Cu**- меди, соответственно:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=c_2} = 0, \quad (14)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=c_2} = 0. \quad (15)$$

Граничные условия в направлении оси **x**:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=a_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=a_1}; T_1 = T_2 \text{ при } 0 \leq y \leq b_1; 0 \leq z \leq c_2, \quad (16)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=a_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=a_2}; T_2 = T_3 \text{ при } 0 \leq y \leq b_2; 0 \leq z \leq c_2, \quad (17)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=a_3} = \alpha_k (T_3 - T_{H_2O}) \text{ при } 0 \leq y \leq b_3; 0 \leq z \leq c_2. \quad (18)$$

Граничные условия в направлении оси **y**:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=b_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=b_1}; T_1 = T_2 \text{ при } 0 \leq x \leq a_1; 0 \leq z \leq c_2, \quad (19)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=b_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=b_2}; T_2 = T_3 \text{ при } a_1 \leq x \leq a_2; 0 \leq z \leq c_2, \quad (20)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=b_3} = \alpha_k (T_3 - T_{H_2O}) \text{ при } 0 \leq x \leq a_3; 0 \leq z \leq c_2. \quad (21)$$

В областях $hd_1 g_1 i$ и $ig_1 e_1 j$, соответственно:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=a_1} = \alpha_k^* (T_1 - T_{ВОЗД}) \text{ при } 0 \leq y \leq b_1; c_2 \leq z \leq c_3, \quad (22)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=b_1} = \alpha_k^* (T_1 - T_{ВОЗД}) \text{ при } 0 \leq x \leq a_1; c_2 \leq z \leq c_3, \quad (23)$$

где α_k и α_k^* - коэффициент теплоотдачи конвекцией (среда-вода и воздух, соответственно), Вт/(м²×град).

Влияние газового (воздушного) зазора 1 учитывается следующим образом:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=a_1} = \sigma_c (T_1^4 - T_2^4) + \frac{\lambda_{ЗАЗОР}}{l_{ЗАЗОР}} (T_1 - T_2) \quad (24)$$

при $0 \leq y \leq b_1; c_1 \leq z \leq c_2$,

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=b_1} = \sigma_c (T_1^4 - T_2^4) + \frac{\lambda_{ЗАЗОР}}{l_{ЗАЗОР}} (T_1 - T_2) \quad (25)$$

при $0 \leq x \leq a_1; c_1 \leq z \leq c_2$,

где σ_c - постоянная Стефана-Больцмана,

$$\sigma_c = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4};$$

$\lambda_{зазор}$ - теплопроводность газа в зазоре, Вт/(м×К);

$l_{зазор}$ - толщина газового (воздушного) зазора, м;
 T_1 - температура поверхности металла, К;
 T_2 - температура поверхности графита, К.

Начальные условия: $T_1 = T_{расплава}$ серебра в момент времени $\tau = 0$; $T_2 = T_{начальная}$ графита в момент времени $\tau = 0$; $T_3 = T_{начальная}$ меди в момент времени $\tau = 0$.

Адекватность построенной модели реальному процессу была проверена на сходимость расчетных значений температуры поверхности заготовки с экспериментальными данными. Расхождение экспериментальных и расчетных значений не превысило 7 %.

По полученным экспериментальным данным был построен график распределения температуры по высоте графитового формообразователя, представленный на рисунке 2.

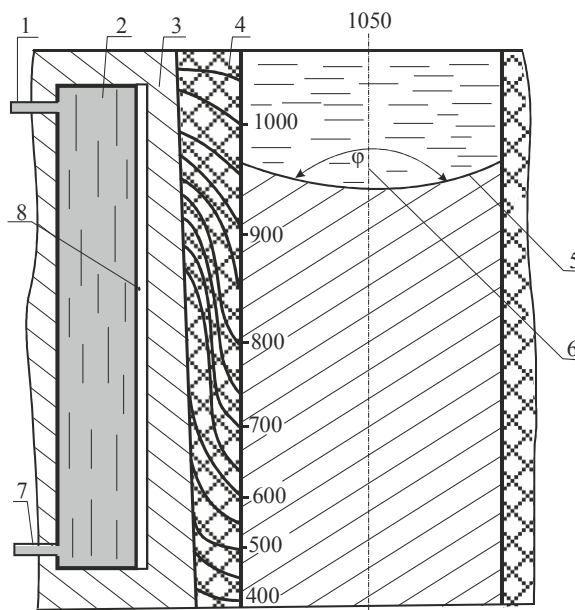


Рис. 2. Схема изменения температурного поля (изотермы) в графитовом формообразователе: 1,7—вход и выход воды; 2-вода (охладитель); 3-медная водоохлаждаемая рубашка; 4-графитовый формообразователь; 5-фронт кристаллизации; 6-угол фронта кристаллизации; 8-воздушный зазор.

Из представленного графика (рисунок 3) видно, что в процессе непрерывного литья серебряной заготовки на входе в формообразователь температура его практически соответствует температуре жидкого металла. В дальнейшем, по мере вытягивания заготовки, при непосредственном протекании процесса кристаллизации (жидкое, жидко-твердое, твердо-жидкое и твердое состояние), наблюдается довольно резкое снижение температуры заготовки.

Температура серебряной заготовки на выходе из графитового формообразователя составила $450 \pm 10^\circ\text{C}$. При этом температура самого графитового формообразователя была несколько ниже ($390 \pm 10^\circ\text{C}$).

Особенности процесса кристаллизации изучаемых заготовок малого сечения, большая теплопроводность серебра и его сплавов $-\lambda \approx 433 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а также высокая скорость охлаждения при непрерывном литье в закрытый вертикальный графитовый формообра-

зователь (250...350°С/сек) являются определяющими параметрами при формировании структуры серебряных заготовок. Следует отметить, что эти особенности кристаллизации обеспечивают угол фронта кристаллизации $\varphi \approx 140...160^\circ$ (рисунок 4).

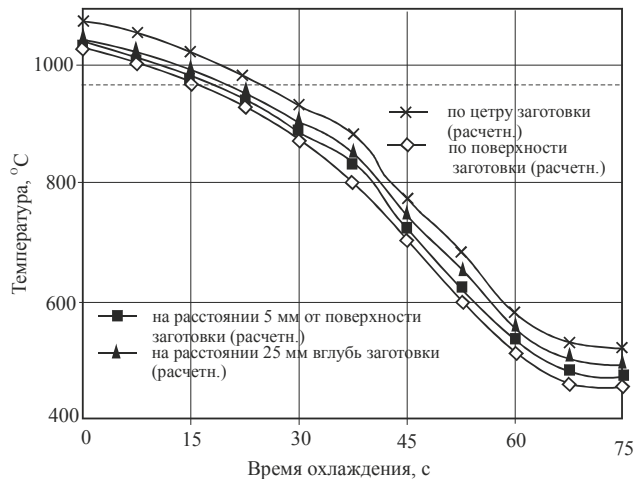


Рис. 3. Распределение температуры по сечению заготовки в зависимости от времени охлаждения в кристаллизаторе

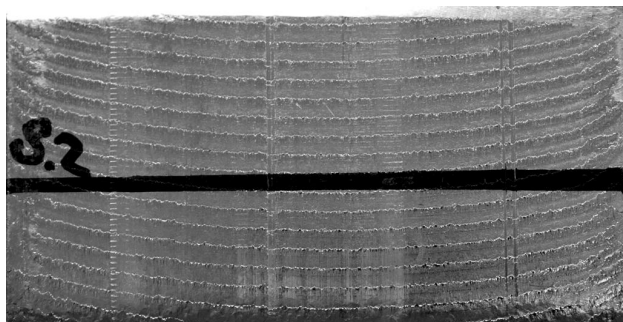


Рис. 4. Фронт кристаллизации при непрерывном литье серебряной полосы (100×5 мм), шаг вытягивания 2 мм

Анализ полученных значений теплового потока в зоне графитового формообразователя и анализа распределения температуры по длине заготовки и наличия специфического угла фронта кристаллизации $\varphi \approx 140...160^\circ$, можно сделать вывод: лунка с жидким металлом при рациональных режимах литья расположена в зоне графитового формообразователя, а фронт кристаллизации при непрерывном вертикальном литье серебра и серебряных сплавов находится в середине формообразователя. При этом, вследствие трансляции тепла затвердевшей заготовкой с высокой теплопроводностью ($\lambda_{Ag} \approx 433$ Вт/(м·К)), отвод тепла осуществляется также по длине в сторону вытягивания заготовки. Об этом свидетельствует и направление роста кристаллов по длине заготовки, рисунок 5.

При непрерывном литье металлов (сплавов) с низкой теплопроводностью - сталь, олово, платина, латунь, алюминий, сплавы алюминия и др. ($\lambda_{сталь} \approx 40...50$; $\lambda_{Sn} \approx 67$; $\lambda_{Pt} \approx 70$; $\lambda_{латунь} \approx 95...110$; $\lambda_{Al+сплав} \approx 160...235$ Вт/(м·К)) фронт кристаллизации менее 90° и, как правило, выходит за пределы кристаллизатора, а отвод тепла

от затвердевающей заготовки происходит в сторону водоохлаждаемой рубашки.

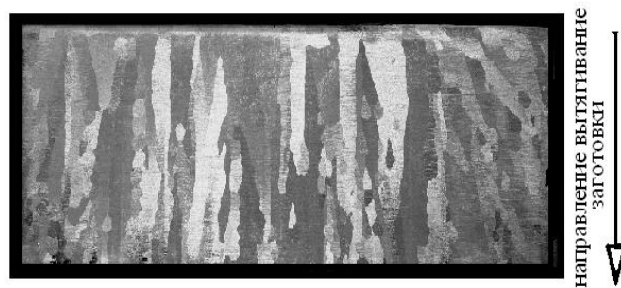
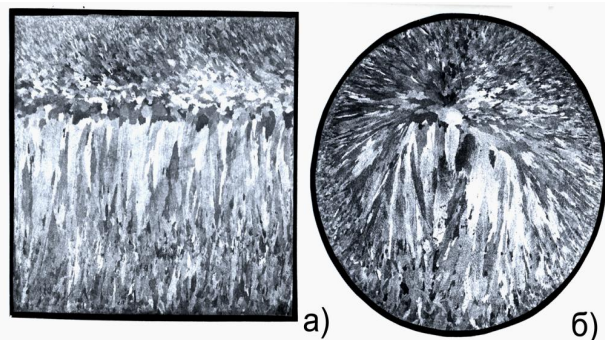


Рис. 5. Макроструктура непрерывно литой заготовки 100×5 мм, серебряный сплав ПСр 50, продольный темплет

Направление роста кристаллов в зоне формирования заготовок из цветных и черных металлов (сплавов) с малым значением теплопроводности при непрерывном горизонтальном и вертикальном литье направлено в сторону меньшего термического сопротивления – водоохлаждаемой медной рубашки, рис. 6. [4].



а – продольный темплет, б – поперечный темплет

Рис. 6. Характер макроструктуры заготовки при горизонтальном непрерывном литье в графитовый формообразователь (Бр ОЦС, \varnothing 100 мм)

Выводы

На основе модели тепловых потоков в расплаве и формообразователе для достижения заданной структуры литого изделия целесообразно учитывать теплофизические характеристики исходного материала, формообразователя и условия кристаллизации расплава.

Литература

1. Бредихин, В. Н. Формирования заготовки при непрерывном литье цветных металлов в горизонтальный кристаллизатор [Текст] / В. Н. Бредихин, Е. Ю. Кушнетрова, И. В. Шутов // Сб. научн. тр. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине». - Донецк: ДонНТУ, 2010. – С. 468-478. – Библиогр. : с. 478.

2. Бредихин, В. Н. Сравнительный анализ структуры и состава фаз сплава ПСр 50 в зависимости от условий разливки [Текст] / В. Н. Бредихин, В. П. Горбатенко, Е. Ю. Кушнерова // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції „Сучасні аспекти металознавства та термічної обробки металів”. - Маріуполь: ПДТУ, 2010. – С. 28-31. – Библиогр. : с. 31.
3. Бредихин, В. М. Благородные металлы [Текст] / В. Н. Бредихин, В. А. Кожанов, Маняк Н. А., Е. Ю. Кушнерова. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2009. – 525 с. – Библиогр. : с. 517-524. – 300 экз. – ISBN 978-966-377-077-2/
4. Кушнерова, Е. Ю. Формирования бронзовой заготовки в закрытом горизонтальном кристаллизаторе [Текст] / Е. Ю. Кушнерова, Н. А. Маняк, В. Н. Бредихин // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 4 (14). – С. 44-48. – Библиогр. : с. 48. ISSN 1816-1200.

Наведено відомості про вплив модифікації діатоміту золем кремнієвої кислоти на реологічні властивості вапняних композицій при введенні пластифікуючих добавок. Показано, що модифікація діатоміту сприяє підвищенню пластифікуючих властивостей вапняних складів

Ключові слова: вапняні композиції, діатоміт, модифікація, пластифікація, міцність

Приведены сведения о влиянии модификации диатомита золем кремниевой кислоты на реологические свойства известковых композиций при введении пластифицирующих добавок. Показано, что модификация диатомита способствует повышению пластифицирующих свойств известковых составов

Ключевые слова: известковые композиции, диатомит, модификация, пластификация, прочность

It provides information on the impact of modification of diatomite sol siliconing acid on the rheological properties of calcareous composition with the introduction of plasticizers. It is shown that modification of diatomite promotes the improvement exists a plasticizing properties of calcareous composition

Keywords: lime compositions, diatomaceous earth, modification, plastification, strength

УДК691.175.746

ВАПНЯНІ ОЗДОБЛЮВАЛЬНІ СКЛАДИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО ДІАТОМІТУ

В. І. Логаніна

Доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою*

Контактний тел.: 8-412-92-94-78

E-mail: loganin@mail.ru

В. Г. Камбург

Доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою

Кафедра прикладної математики та інформатики**

Контактний тел.: 8-412-49-61-52

E-mail: kamburg@rambler.ru

О. А. Давидова

Старший викладач*

Контактний тел.: 8-412-92-94-78

E-mail: oda@mail.ru

Е. Е. Симонов

Аспірант

*Кафедра стандартизації, сертифікації та аудиту якості

**Пензенський державний університет архітектури і

будівництва

вул. Г.Тітова, 28, м. Пенза, 440028

Контактний тел.: 8-412-92-94-78

E-mail: simonov888@list.ru

Введення

Враховуючи потребу будівництва, житлово-комунального господарства і приватних осіб в недорогих сухих будівельних сумішах (СБС) різного призначення, актуальним є розробка економічних СБС. Рішенням цієї проблеми може бути використання місцевих мінерально-сировинних ресурсів. На території По-

волжжя є значні запаси, які є цінною сировиною для виробництва будівельних матеріалів. Діатоміт являє собою пористу кремністу породу, яка містить до 82% кремнезему SiO₂. Ці властивості діатомітов широко використовують при виробництві товарного бетону, будівельних розчинів і сухих будівельних сумішей різного призначення.