



There are studied the regularities of the columnar and globular crystallization at casting of large- and small-sort slugs at bow-type plants. There are formulated the main requirements to the organization of water-air cooling and application of electromagnetic confusion with the purpose of receiving of the qualitative metal production.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, БНТУ, Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан» (г. Екатеринбург),
С. С. БРОДСКИЙ, Ассоциация сталеплавателей Украины, В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»,
С. М. КАБИШОВ, БНТУ, Е. В. КАЛИНЕВИЧ, БГУ

УДК 669.041

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТОЛБЧАТОЙ И ГЛОБУЛЯРНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ НА РАДИАЛЬНЫХ МНЛЗ

При обосновании и разработке рациональных режимов затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок необходимо учитывать основную особенность процесса – высокое значение отношения глубины жидкой лунки к размеру поперечного сечения заготовки. При этом с точки зрения качества литой заготовки одним из важнейших параметров является кристаллическая структура стали – столбчатая или глобулярная. При преобладании столбчатой (дендритной) структуры весьма вероятным становится образование осевой сегрегации и осевых усадочных раковин за счет блокировки дендритными мостами процесса подпитки усадочных зон. Преобладание же глобулярной кристаллической структуры способствует формированию более однородной структуры в отношении распределения основных легирующих компонентов сплава и таких примесей, как сульфиды и оксиды.

Ниже с использованием методики расчета длин зон столбчатой и глобулярной кристаллизации [1] исследованы закономерности формирования кристаллической структуры крупно- и мелкосортных заготовок, разливаемых на МНЛЗ. При этом процесс формирования непрерывнолитой заготовки разделен на четыре стадии (рис.1): 0 – формирование заготовки в пределах кристаллизатора; I – затвердевание при наличии перегрева жидкой фазы с образованием столбчатых кристаллов; II – затвердевание переохлажденного расплава с образованием зоны глобулярных или равноосных кристаллов; III – охлаждение полностью затвердевшей заготовки. Поперечное сечение прямоугольной или квадратной заготовки заменяли цилиндрической заготовкой с эквивалентным радиусом. Тогда математическая модель исходной задачи имеет вид

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right)_{r=b(t)} = -\rho_2 L \frac{db}{dt} - \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right)_{r=b(t)}, \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right)_{r=R} = \alpha_1 [T_1(R, t) - T_c], \quad (3)$$

$T_1(r, 0) = T_{1нач}$, $T_2(r, 0) = T_{2нач}$, $b(0) = b_0$, (4)
где $i=1, 2$ – соответственно для твердой и жидкой фазы.

Для решения задачи использован метод интегральных соотношений Лейбензона, достаточно хорошо зарекомендовавший себя при решении задач кристаллизации стальных слитков и заготовок [2, 3].

Протяженность зоны столбчатой кристаллизации и время пребывания заготовки в зоне I:

$$z_1 = v_n \Delta \tau_1 = v_n \left(\frac{\rho c}{\lambda} \right) R^2 \Delta \tau_1, \quad (5)$$

$$\Delta \tau_1 = \int_{y(\tau)}^{y_0} F_1(y, \theta_n) dy, \quad (6)$$

где

$$F_1(y, \theta_n) = \frac{1-y}{\theta_n} \left\{ \frac{\theta_n}{6} (1+2y) + Ky + \frac{\theta}{y_0 - y_1} \left[\frac{y^2}{2} + y(y - y_1) \right] - \frac{\theta}{y_0^m (y_0 - y_1)} \left[(y - y_1) y^{m+1} + \frac{1}{m+2} y^{m+2} \right] \right\}, \quad (7)$$

причем $y(\tau) < y_0$.

Интеграл в правой части решения (6), (7) проще всего подсчитать одним из распространенных численных методов (например, по методу Симпсона), задавая в качестве исходных данных 13 числовых значений для следующих параметров: $R, \rho, c, \lambda, L, m, T_{лик}, T_c, T_{2,0}, T_{нов}, b_0, b_1$ и v_n .

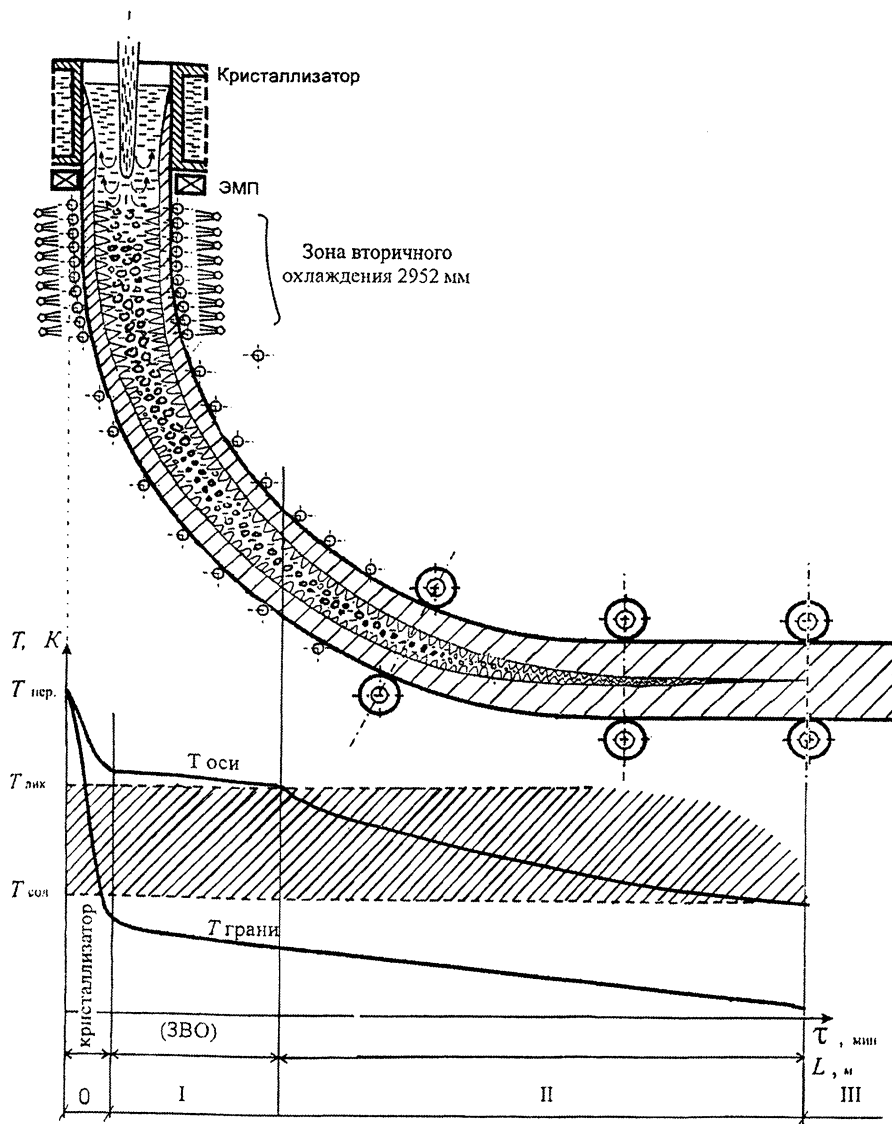


Рис. 1. Изменение температур на оси и поверхности литой заготовки и расположение участков 0, I, II, III вдоль технологической линии МНЛЗ

Для перевода управляющих воздействий от параметра θ_n к усредненным коэффициентам теплоотдачи используем

$$\theta_n = \frac{1}{1 + \frac{1}{Bi(1-y)}}$$

Из формулы (5) можно найти взаимосвязь усредненного коэффициента теплоотдачи с относительной температурой поверхности слитка:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \theta_n}{R} \frac{1}{1 - \theta_n} \frac{1}{1 - y}$$

Для перехода от усредненного коэффициента теплоотдачи α_1 к реальному расходу охлаждающей воды q рекомендуется использовать эмпирическое соотношение [4]:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \eta_k q, \quad (8)$$

где $\alpha_0 \approx 140-160$ Вт/(м²·К); $\eta_k \approx 40$ Вт·ч/(м³·К) и удельный расход воды изменяется от 0,5 до 6,0 м³/(м²·ч) для МНЛЗ радиального и криволинейного типов.

Протяженность зоны глобулярной кристаллизации и время пребывания заготовки в зоне II:

$$z_2 = v_n \Delta t_2 = v_n \frac{\rho c R^2}{\lambda} \Delta \tau_2, \quad (9)$$

$$\Delta \tau_2 = \tau \cdot \ln \frac{T_{лик} - T_c}{T_{сол} - T_c}, \quad (10)$$

где
$$\tau = \left(1 - y_1 + \frac{1}{Bi_2}\right) \left[\frac{1}{2} + \frac{K}{2\theta_c} y_1^2 - \frac{\frac{1}{3}(1 - y_1^2) + \frac{y_1}{2}(1 - y_1)}{1 + \frac{1}{Bi_2(1 - y_1)}} \right]$$

Задача управления процессом кристаллизации непрерывнолитой заготовки с целью повышения ее качества сводится к стремлению уменьшить протяженность зоны столбчатых кристаллов и соответственно увеличить протяженность зоны глобулярных кристаллов за счет изменения ряда технологических параметров (скорости вытягивания заготовки, интенсивности орошения поверхности заготовки,

использования электромагнитного перемешивания и др.). С этой целью осуществили многовариантный расчет и анализ влияния указанных выше параметров на протяженность зон столбчатой и глобулярной кристаллизации при разливке крупносортовых заготовок сечением 335x400 мм и мелкосортовых заготовок сечением 125x125 мм, при этом коэффициенты внешнего теплообмена подбирались с учетом интенсивности орошения в зоне вторичного охлаждения и ее протяженности. Эффект движения расплава вдоль фронта кристаллизации за счет применения электромагнитного перемешивания учитывали путем завышения коэффициента теплопроводности жидкой фазы. Анализ результатов расчета показал, что наибольшее влияние на протяженность зон столбчатой и глобулярной кристаллизации оказывают скорость разливки, коэффициент внешнего теплообмена в зоне I (т. е. практически в зоне вторичного охлаждения) и изменение коэффициента теплопроводности жидкой стали, т. е. применение устройств электромагнитного перемешивания.

На рис. 2–4 приведены результаты расчетов зон столбчатой и глобулярной кристаллизации для условий разливки крупносортовых заготовок сечением 335x400 мм на примере МНЛЗ Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского. Машина непрерывной разливки является криволинейной с базовым радиусом 14 м, длина участка вторичного водовоздушного охлаждения (четыре секции) составляет 6,28 м.

Результаты расчетов по изменению длины зоны столбчатых кристаллов z_1 в зависимости от коэффициента теплоотдачи для разливки непрерывнолитой заготовки поперечным сечением 335x400 мм на примере сталей 65 (рельсовая) и 40Х при различной скорости разливки представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что независимо от марки стали и скорости разливки имеет место одинаковая качественная зависимость изменения длины зоны кристаллизации z_1 от коэффициента теплоотдачи α_1 : в конкретном случае с повышением α_1 от 100 до 200 Вт/(м·К) наблюдается увеличение протяженности зоны столбчатых кристаллов, при дальнейшем росте коэффициента теплоотдачи (от 200 до 400 Вт/(м·К)) длина зоны z_1 монотонно снижается. С точки зрения количественного анализа приведенных на рисунке данных очевидно, что повышение скорости разливки (в конкретном случае от 0,5 до 0,7 м/мин) приводит к увеличению протяженности зоны z_1 , что вызывает определенные трудности при необходимости повышения производительности МНЛЗ.

Таким образом, учитывая, что низкие коэффициенты внешнего теплообмена в зоне I могут привести к образованию толщины твердой корочки, неспособной выдержать ферростатическое

давление жидкой стали и, как следствие, к аварийному прорыву жидкого металла, имеет смысл при заданной конкретной скорости разливки с точки зрения управления кристаллической структурой заготовки интенсифицировать процесс ее охлаждения за счет повышения расхода воды в зоне вторичного охлаждения.

На рис. 3 приведены данные изменения длины зоны столбчатых кристаллов в зависимости от значения коэффициента теплопроводности жидкой стали $\lambda_{ж}$. При этом, учитывая рекомендации работы [5], величину $\lambda_{ж}$ изменяли от 25 до 80 Вт/(м·К). Из рисунка видно, что повышение коэффициента теплопроводности оказывает весьма существенное влияние на уменьшение протяженности зоны столбчатых кристаллов z_1 , причем эффективность этого влияния тем выше, чем меньше коэффициент внешнего теплообмена α_1 . Из анализа полученных данных следует еще одно важное обстоятельство: при использовании электромагнитного перемешивания длина зоны столбчатых кристаллов z_1 практически не зависит от скорости разливки, т. е. в конкретном случае имеется возможность осуществлять разливку заготовок с повышенными скоростями, обеспечивая при этом необходимое качество стали за счет уменьшения протяженности зоны дендритных кристаллов.

Аналогичным образом осуществили анализ влияния перечисленных выше технологических факторов (скорости разливки, коэффициента внешнего теплообмена α_2 , коэффициента теплопроводности жидкой фазы $\lambda_{ж}$) на изменение длины зоны глобулярных кристаллов z_2 . При этом установлено, что изменение $\lambda_{ж}$ практически не оказывает влияния на величину z_2 , что является достаточно очевидным фактом из-за незначительного количества жидкой фазы в непрерывнолитой заготовке. На рис. 4 показано изменение протяженности зоны глобулярных кристаллов z_2 от коэффициента теплоотдачи на поверхности заготовки. Из рисунка видно, что величина z_2 прямо пропорционально зависит от интенсивности внешнего теплообмена. Это, по всей видимости, объясняется более равномерным охлаждением заготовки по ее сечению за счет выравнивания температур.

С целью установления закономерностей образования столбчатой и глобулярной кристаллизации при затвердевании мелкосортовых заготовок осуществили аналогичные расчеты для условий разливки заготовок сечением 125x125 мм на МНЛЗ-1,2 РУП «Белорусский металлургический завод». Радиус разливочной дуги МНЛЗ составляет 5 м, длина кристаллизатора – 0,78 м, длина зоны вторичного охлаждения (три секции) – 5,23 м. В конкретном случае ограничились расчетом показателей кристаллизации для одной фиксированной скорости разливки 2,5 м/мин, марка стали – сталь 45.

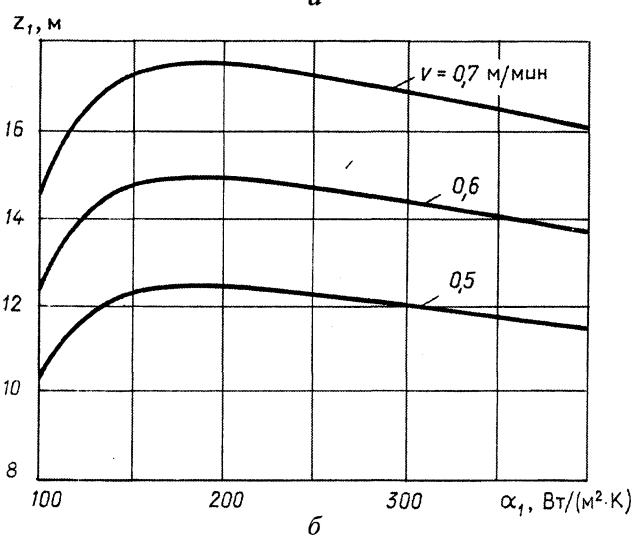
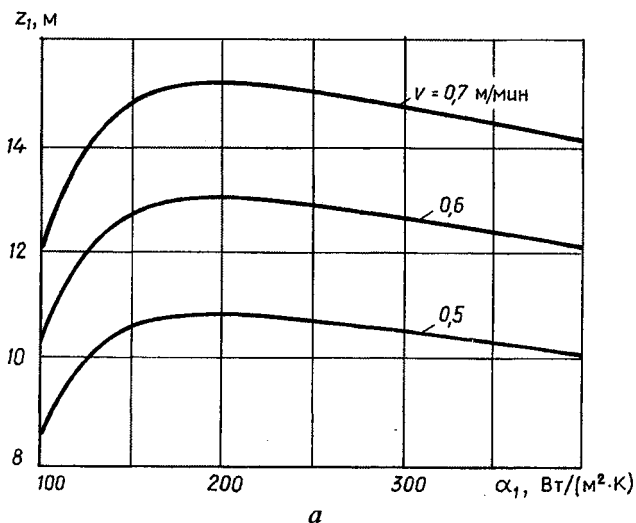


Рис. 2 Зависимость длины зоны столбчатых кристаллов z_1 от коэффициента внешней теплоотдачи α_1 при разливке заготовки сечением 335x400 мм: а – сталь 65; б – сталь 40X

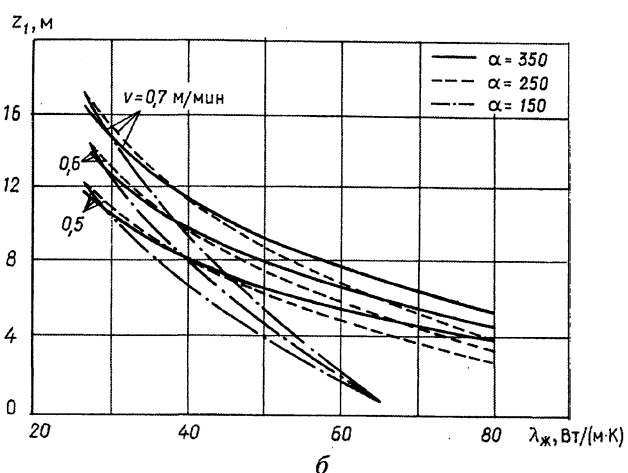
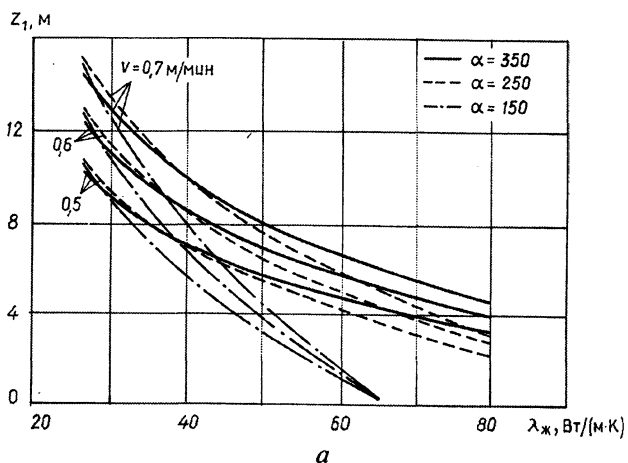


Рис. 3 Зависимость длины зоны столбчатых кристаллов z_1 от коэффициента теплопроводности жидкой стали $\lambda_{ж}$ при разливке заготовок сечением 335x400 мм: а – сталь 65; б – сталь 40X (— $\alpha_1 = 350$ Вт/(м²·К); - - - $\alpha_1 = 250$ Вт/(м²·К); ···· $\alpha_1 = 150$ Вт/(м²·К))

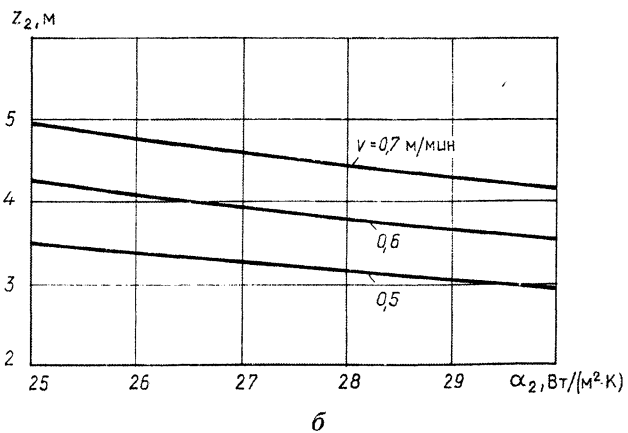
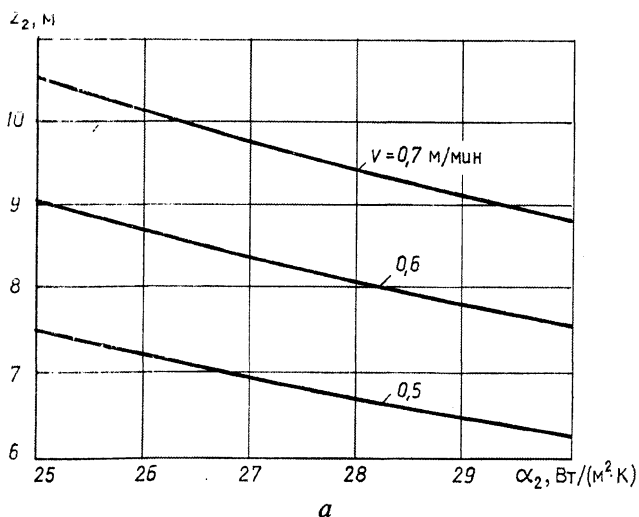


Рис. 4 Зависимость длины зоны глобулярных кристаллов z_2 от коэффициента внешнего теплообмена α_2 при разливке заготовок сечением 335x400 мм: а – сталь 65; б – сталь 40X

Результаты расчета приведены на рис. 5, из которого видно, что качественная зависимость протяженности зон столбчатых и глобулярных кристаллов от коэффициентов внешнего теплообмена и воздействия электромагнитного перемешивания носит характер, аналогичный при кристаллизации крупносортовых заготовок. Вместе с тем влияние параметров внешнего теплообмена α и величины теплопроводности жидкой стали $\lambda_{ж}$ является менее выраженным. Так, при увеличении коэффициента теплообмена на поверхности заготовки α_1 до определенных значений длина зоны столбчатой кристаллизации z_1 возрастает, а при достижении определенной величины (400 Вт/(м²·К)) дальнейшее увеличение α_1 практически не оказывает влияния на величину z_1 . При использовании электромагнитного перемешивания (увеличении коэффициента теплопроводности жидкой стали $\lambda_{ж}$) наблюдается уменьшение протяженности зоны z_1 , при этом снижение коэффициента внешнего теплообмена α_1 приводит, как и в случае разливки крупносортовых заготовок, к большей эффективности этого влияния. Однако в целом кривые имеют более пологий характер, что объясняется меньшим значением металлургической длины заготовки.

Таким образом, очевидно, что наиболее целесообразным представляется управлять кристаллической структурой заготовок в ходе непрерывного литья с целью повышения качества металла в два этапа: в зоне образования столбчатых кристаллов (после выхода заготовки из кристаллизатора) использовать установки электромагнитного перемешивания при интенсификации процессов внешнего теплообмена за счет увеличения расхода воды, в зоне образования глобулярных кристаллов — только за счет изменения внешнего охлаждения (без использования принудительного охлаждения). Следует также отметить еще одно преимущество использования установок электромагнитного перемешивания в конкретном случае (наряду с уменьшением протяженности зоны столбчатых кристаллов) — выравнивание перепада температур по сечению заготовки, возникающего вследствие интенсификации внешнего теплообмена на поверхности заготовки.

Литература

1. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. Стальной слиток. В 3-х т. Т.2. Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.

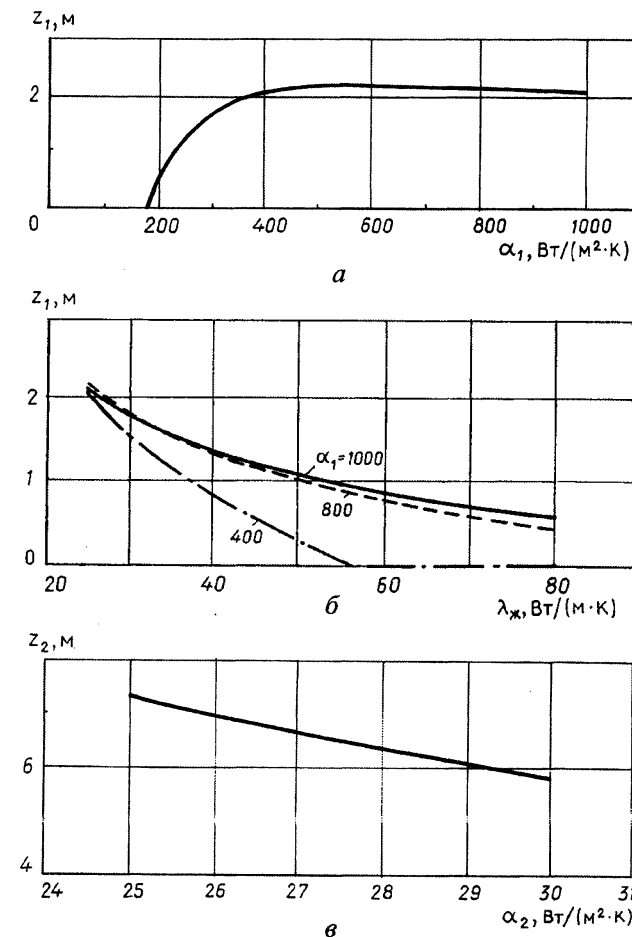


Рис. 5. Зависимость длины зоны столбчатых кристаллов z_1 от коэффициента внешней теплоотдачи α_1 (а), коэффициента теплопроводности жидкой стали $\lambda_{ж}$ (б) и длины зоны глобулярных кристаллов z_2 от коэффициента внешнего теплообмена α_2 при разливке заготовок сечением 125x125 мм из стали 45

2. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Расчеты затвердевания отливок цилиндрической формы по методу Лейбензона // ИФЖ. 1987. Т. 52. № 2. С. 339–340.

3. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Малькевич Н.Г. Инженерные способы расчетов затвердевания непрерывнолитых заготовок // Изв.вузов. Энергетика. 1990. №7. С. 99–100.

4. Самойлович Ю.А., Крулевецкий С.А., Горяинов В.А., Кабаков З.К. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Под ред. Ю.А. Самойловича. М.: Металлургия, 1982.

5. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Маточкин В.А. Расчет температур, напряжений и деформаций при производстве непрерывнолитых заготовок. Сообщение I. Решение связанных задач нестационарной термовязкоупругости для затвердевающих заготовок в ходе непрерывного литья // Литье и металлургия. 2002. № 3. С. 53–59.