

There is investigated the influence of hydrodynamic and thermalphysic characteristics of the liquid cast iron flows in crystallizer on formation of castings at continuously circular casting by frosting.

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ф. БЕВЗА, В. Ю. СТЕЦЕНКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 001.57:74.047

ГИДРОДИНАМИКА РАСПЛАВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Отличительной особенностью литья заготовок методом намораживания (направленного затвердевания) является отсутствие стержня при получении полых отливок типа втулок [1]. Наружная поверхность отливки ограничивается постоянной водоохлаждаемой формой, а внутренняя формируется непосредственно из расплава при интенсивном радиальном отводе тепла. Затвердевание металла в кристаллизаторе происходит непрерывно в течение всего времени разливки, а извлечение заготовок и подачу жидкого металла осуществляют циклически с заданным периодом. Причем в каждом цикле затвердевает только периферийная часть объема жидкого металла, участвующего в формировании данной отливки, т. е. время затвердевания отливки всегда меньше времени, необходимого для затвердевания всего металла, залитого в кристаллизатор. Соответственно толщина стенки отливки не имеет жесткой регламентации и определяется теплофизическими характеристиками материала отливки и кристаллизатора, технологическими режимами литья и условиями взаимодействия фронта затвердевания с расплавом, которые в значительной степени оказывают влияние на процесс затвердевания металла.

Принципиальная схема непрерывно-циклического литья намораживанием (НЦЛН) представляет собой систему сосудов (кристаллизатор — литейная чаша), соединенных посредством сифонного металлопровода и заполненных жидким металлом. Из одного из них (кристаллизатора) периодически извлекают затвердевшую корку, составляющую тело отливки, а через другой (литейную чашу) с тем же периодом компенсируют удаленный объем металла новой порцией расплава. При этом состояние расплава в кристаллизаторе существенно изменяется в течение времени затвердевания отливки и соответственно изменяются условия теплоотдачи от жидкого металла к фронту затвердевания. В момент извлечения отливки вся система выводится из состояния равновесия и начинается переходной гидродинамический процесс, обусловленный возник-

новением в жидкой ванне кристаллизатора вынужденных циркуляционных потоков расплава, вызванных возмущающим воздействием движущейся отливки, подачей новой порции расплава в литейную чашу и его перетеканием в кристаллизатор.

После извлечения отливки и заполнения кристаллизатора до заданного уровня возмущающие воздействия на расплав прекращаются, что вызывает снижение интенсивности вынужденных потоков, а затем их полное затухание. Система приходит в состояние устойчивого равновесия, при котором движение расплава в кристаллизаторе происходит в режиме свободной конвекции, определяемой перепадом температур по жидкой ванне в осевом и радиальном направлении. Это равновесие вновь нарушается при извлечении очередной отливки и такой процесс повторяется в течение всей разливки, т.е. внешние возмущающие силы накладываются на систему циклически.

Таким образом, затвердевание каждой отливки на начальном этапе происходит при наличии вынужденных циркуляционных потоков в жидкой ванне кристаллизатора, которые определяют интенсивность теплоотдачи от жидкого металла к затвердевающей корке. В последующие моменты времени после затухания вынужденных потоков фронт затвердевания взаимодействует с расплавом, находящимся в состоянии свободной конвекции. В связи с этим определение интенсивности теплоотдачи от жидкого металла необходимо производить с учетом изменения гидродинамической обстановки в кристаллизаторе.

Закономерности теплоотдачи от расплавленных металлов вблизи температур затвердевания изучены недостаточно. При вынужденной конвекции, как правило, используют зависимости вида $Nu=f(Re, Pr)$. Например, в работе [2] при вынужденном движении жидкой стали коэффициент теплоотдачи на границе раздела фаз α_1 предлагается определять по формуле:

$$Nu = 5,0 + 0,021Re, \quad (1)$$

где Nu и Re — соответственно критерии Нуссельта и Пекле.

Однако формулу (1) рекомендуется применять только в случаях, когда $100 < Re < 20000$, а $Re > 10^4$ [3, 4]. В нашем случае, как показали исследования, значение критерия Re не превышает величины $7 \cdot 10^3$.

В работе [5] отмечается, что хорошие результаты дает расчет по формуле

$$Nu = 1,1 [(1 - Pr)^{0,33} Pe]^{0,5}, \quad (2)$$

где Pr – критерий Прандтля.

При проведении расчетов по определению α_1 приняты следующие значения теплофизических величин для жидкого чугуна с углеродным эквивалентом $C_3 = 3,8$: коэффициент кинематической вязкости $\nu_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [7], коэффициент температуропроводности $a_1 = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [8, 9], коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 23,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [8], удельная теплоемкость $c_1 = 570 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [10], плотность $\rho = 7000 \text{ кг}/\text{м}^3$ [11]. Расчет проведен для отливки наружным диаметром 157 мм, высотой 160 мм. В качестве определяющего размера ($d_{\text{эк}}$) принимали средний внутренний диаметр отливки с учетом изменения толщины затвердевающей корки: в период $\tau \leq 6 \text{ с}$ $d_{\text{эк}} = 0,153 \text{ м}$; в интервале $6 \text{ с} < \tau \leq 10 \text{ с}$ $d_{\text{эк}} = 0,147 \text{ м}$. Значения скорости вынужденных потоков принимали по данным, приведенным в работе [6]. Скорости циркуляционных потоков определяли в трех зонах по высоте кристаллизатора, расположенных на расстоянии 25 мм – I зона; 45 мм – II зона; 65 мм – III зона от его нижнего торца. Характер локальных потоков, возникающих в расплаве в момент извлечения отливки и заливки новой порции, зависит от способа его подачи и формирования струй поступающего в кристаллизатор металла. Определяющую роль при этом играет конструкция соединительного стакана. Изучена циркуляция жидкости при ее подаче в кристаллизатор через центральный цилиндрический и конический питатель, шелевые периферийные питатели и комбинированным способом (центральный и шелевые периферийные питатели).

В начальный момент времени (продолжительностью $\sim 1 \text{ с}$) при извлечении отливки характер потоков, вызванных ее движением, во всех случаях одинаков. Пристеночные слои расплава за счет вязкостных сил получают ускорение и увлекаются движущейся отливкой вверх. Одновременно расплав, находящийся в центральной части кристаллизатора, поступает в освобождающееся пространство и уровень металла в кристаллизаторе падает. При этом, независимо от вида соединительного стакана, под нижним торцом движущейся отливки возникают интенсивные торообразные потоки. Увеличение высоты отливки и скорости ее извлечения способствует усилению этого эффекта. Например, при извлечении отливки диаметром 100 мм и высотой 250 мм со скоростью 0,3 м/с время существования этих потоков составляет уже около 3 с. Скорость

циркуляционных потоков в начальный момент времени имеет максимальное значение и составляет около 60 мм/с.

Одновременно с извлечением отливки начинается процесс перетекания расплава из литниковой системы и заполнение кристаллизатора до заданного уровня. В этот период ($1,5 \text{ с} \leq \tau \leq 4 \text{ с}$) происходит перестройка гидродинамических потоков, которые определяются схемой подачи металла. При центральной и комбинированной подаче расплава максимальная скорость циркуляционных потоков наблюдается в III зоне и составляет в среднем 15–20 мм/с. Применение стакана с шелевыми питателями формирует рассредоточенные вертикальные потоки по числу питателей, высота воздействия которых не превышает 40–50 мм, т. е. скорость потоков в I зоне выше, чем в вышележащих зонах. После окончания процесса перетекания в интервале $5 \text{ с} \leq \tau \leq 10 \text{ с}$ расплав во всех случаях движется по инерции со средней скоростью 6–10 мм/с.

Характер и интенсивность вынужденных потоков определяется не только способом подачи расплава, но и геометрическими параметрами отливки и сечением элементов литниковой системы. Например, при литье в кристаллизатор диаметром 100 мм, высотой 250 мм применение стакана с центральным питателем, составляющим 0,8 от диаметра отливки в период $3 \text{ с} < \tau < 7 \text{ с}$, создает хорошо сформированный наклонный поток (рис. 1, а). На высоте около 100 мм происходит его закручивание, он теряет свою интенсивность и гаснет. Такое воздействие приводит к значительному локальному размыву и неравномерности толщины стенки отливки. Уменьшение подводящего отверстия стакана до 0,5 диаметра кристаллизатора изменяет характер потока. Он становится более концентрированным и имеет вертикальное направление. На высоте около 70 мм этот поток закручивается и распадается (рис. 1, б).

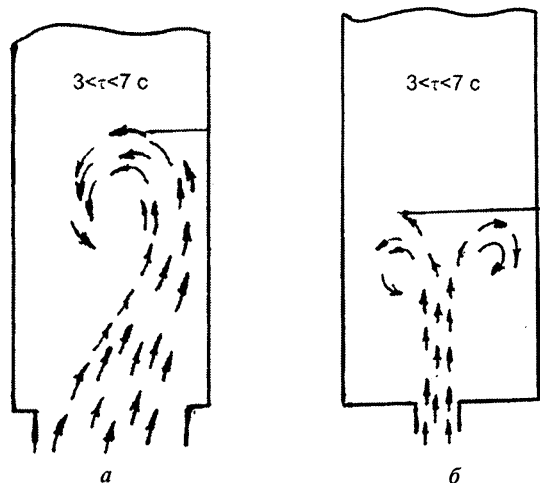


Рис. 1. Гидродинамические потоки в кристаллизаторе при центральной подаче расплава: а – питатель диаметром 80 мм; б – диаметром 50 мм

Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что изменение α_1 соответствует изменению скорости циркуляционных потоков. Коэффициент α_1 имеет максимальное значение в тот момент времени и в той зоне кристаллизатора, в которой максимальное значение имеет скорость вынужденных потоков (рис. 2). Этот коэффициент резко возрастает в зоне интенсивных циркуляционных потоков, которые разрушают относительно неподвижный пограничный слой жидкого металла, препятствуя образованию жидко-твердой составляющей двухфазной зоны и тормозя рост твердой оболочки. Чем больше скорость и концентрация потоков, тем больше величина α_1 и значительнее неравномерность фронта затвердевания.

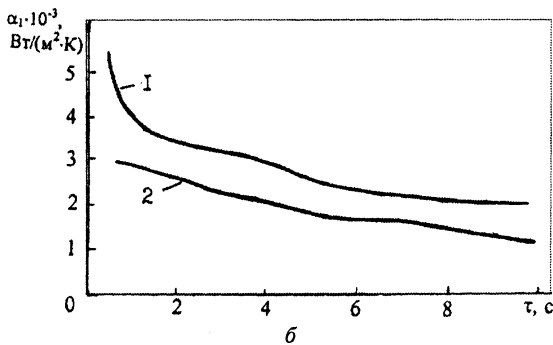
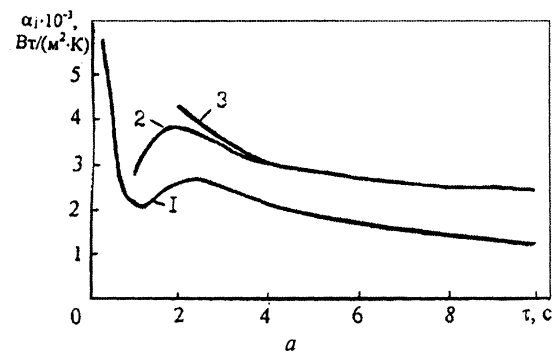


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи на фронте затвердевания во времени при центральной (а) и периферийной (б) подаче металла в кристаллизатор: 1 – на расстоянии 30 мм от нижнего торца кристаллизатора; 2 – 40–50; 3 – 60–70 мм

Существенная разностенность затвердевающей корки образуется именно в начальный момент затвердевания, когда действуют интенсивные локальные потоки расплава. Например, при литье заготовок диаметром 157 мм, высотой 160 мм с центральной цилиндрической подачей расплава коэффициент теплоотдачи α_1 в момент времени $\tau \geq 1$ с имеет минимальное значение в нижней зоне кристаллизатора (рис. 2, а, кривая 1). Это определяет повышенную скорость затвердевания металла в этой зоне и приводит к образованию внутреннего прилива по периметру нижнего торца отливки ("сапога") (рис. 3, а). Следует отметить, что образованию "сапога" способствует также аккумуляция тепла материалом стакана. Образующийся таким образом прилив неоправданно

увеличивает металлоемкость отливки и повышает трудоемкость механической обработки. При использовании центрального конического питателя размывание стенки отливки может происходить почти на половине ее высоты (рис. 3, б).

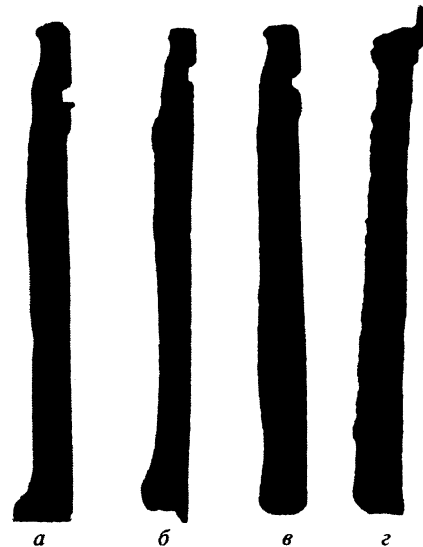


Рис. 3. Продольные шаблоны отливок диаметром 157 мм, высотой 160 мм

Установлено, что неравномерность толщины стенки, образовавшаяся в начальный момент затвердевания, практически не сглаживается в последующий период и сохраняется в течение всего времени формирования в кристаллизаторе. В результате отливки получают с локальной разностенностью по высоте, что приводит к повышенным припускам на механическую обработку либо к браку по "черноте".

Для минимизации разностенности отливок необходимо организовать подачу металла в кристаллизатор таким образом, чтобы в начальный момент исключить образование "сапога" на нижнем торце и локальный размыв корки в вышележащих зонах, а в последующий период обеспечить примерно одинаковую интенсивность теплоотдачи по всему фронту затвердевания. Хорошие результаты в этом отношении при литье заготовок диаметром более 100 мм показал способ подачи металла через щелевые периферийные питатели и по комбинированному варианту (центральный и периферийные питатели) (рис. 3, в, г). Максимальная интенсивность теплоотдачи (α_1) в начальный момент в нижней зоне кристаллизатора, обусловленная рассредоточенными вертикальными потоками по периферии затвердевающей корки (см. рис. 2, б), препятствует образованию "сапога", а относительно равномерное изменение α_1 в последующий период времени обеспечивает примерно одинаковую скорость затвердевания по всему фронту, что минимизирует разнотолщинность стенки отливки (рис. 3, в, г).

Следует отметить также, что периферийная подача расплава способствует исключению коле-

баний мениска металла в кристаллизаторе после извлечения отливки. Это условие необходимо обеспечивать по требованию технологии для устранения брака по неспаям и заворотам.

При литье заготовок малого диаметра, соизмеримого с диаметром канала металлопровода, применяют, как правило, центральную подачу металла в кристаллизатор. В связи с тем что диаметр кристаллизатора мало отличается от диаметра выходного отверстия питателя, застойная зона в нижней части кристаллизатора практически отсутствует. Это исключает образование внутреннего прилива на нижнем торце отливки и способствует получению равномерной толщины стенки (рис. 4). Разностен по высоте определяется только разностью времени затвердевания верхней и нижней части отливки, обусловленной технологическими особенностями процесса литья.

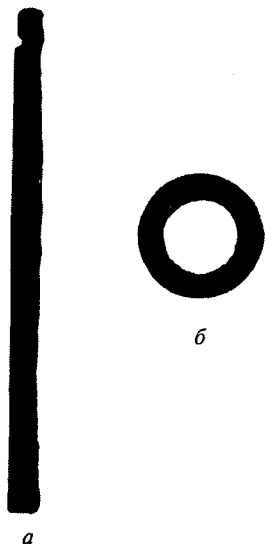


Рис. 4. Продольное (а) и поперечное (б) сечение отливки диаметром 58 мм, высотой 200 мм

После затухания вынужденных циркуляционных потоков в жидкой ванне кристаллизатора имеет место только свободная конвекция, обусловленная разностью температур жидкого чугуна у фронта затвердевания и в осевой зоне кристаллизатора. Перемещение массы расплава в условиях различия температур происходит за счет подъемной силы, возникающей в поле тяготения при изменении плотности расплава с различной температурой (архимедова сила). Как уже указывалось, кристаллизатор представляет собой вертикальную осесимметричную камеру с равномерным радиальным теплоотводом по всей наружной поверхности затвердевающей отливки. При этом в осевой части жидкой ванны кристаллизатора образуются – восходящие потоки, а вдоль фронта затвердевания – нисходящие (рис. 5). (Теплоотвод от мениска металла в кристаллизаторе не учитывался.)

Следует отметить, что в некоторых случаях целесообразно применять центральную подачу металла в кристаллизатор и при литье заготовок большого диаметра (когда объем их производства относительно невелик). Дело в том, что материалоемкость и трудоемкость изготовления стакана для центральной подачи металла значительно меньше по сравнению со стаканом с периферийными питателями. При этом величину "салога" на нижнем торце отливки можно минимизировать путем подбора оптимального соотношения параметров литниковой системы.

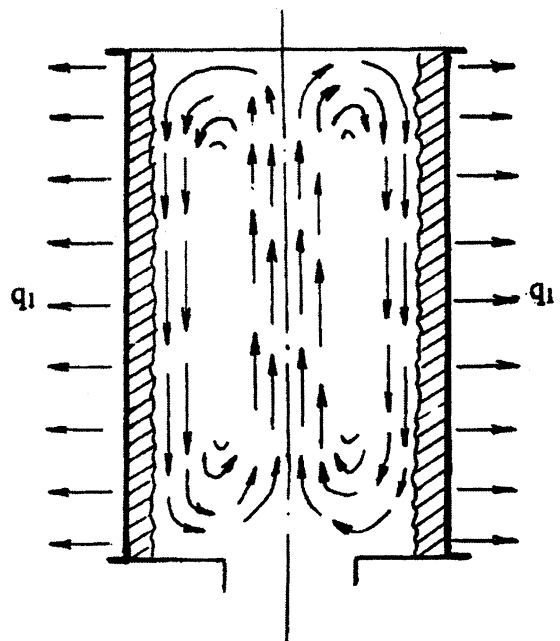


Рис. 5. Конвективные потоки в кристаллизаторе при равномерном радиальном теплоотводе

В случае свободной конвекции определение α_1 производили по приближенному критериальному уравнению, полученному авторами работы [5] и проверенному ими с помощью теплового зонда в ковшах для нескольких расплавленных металлов (чугун, алюминий, цинк):

$$Nu = 0,12Ra^{0,33}, \quad (3)$$

где $Ra = Gr Pr = g \beta \Delta T \frac{d_{эк}^3}{\nu_1 a_1}$ – критерий Релея;

β – температурный коэффициент объемного расширения, $1/^\circ C$; ΔT – разность температур; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

При вычислении критерия Грасгофа физические параметры определяли при средней температуре пограничного слоя:

$$T_{cp} = \frac{T_{затв.} + T_m}{2} = \frac{1150 + 1300}{2} \approx 1230^\circ C.$$

В расчетах принято: $g = 9,8 m/c^2$; $\beta = 105 \cdot 10^{-6} 1/K$ [11]; $\Delta T = T_m - T_{затв.} = 1300 - 1150 = 150 K$;

$$d_{эк} = \frac{0,157 + 0,133}{2} = 0,145 \text{ м (при } \xi_k = 0,012 \text{ м); } \nu_1 = 40 \cdot 10^{-6} m^2/c \text{ [7].}$$

Расчеты показали, что при свободной конвекции коэффициент теплоотдачи от расплава к фронту затвердевания α_1 в кристаллизаторе диаметром 157 мм составляет около 900 Вт/($m^2 \cdot K$). При этом уже исключаются локальные размывы затвердевающей корки и темп ее намораживания сохраняется примерно одинаковым по всему фронту затвердевания.

Анализ плотности теплового потока на фронте затвердевания (q_1), рассчитанного по формуле:

$$q_1 = \alpha_1 (T_m - T_{затв.}), \quad (4)$$

показал, что в течение времени действия вынужденных потоков этот параметр изменяется в диапазоне $(8,6 - 1,6) \cdot 10^5$ Вт/м² и уменьшается до $1,35 \cdot 10^5$ Вт/м² к концу времени затвердевания отливки.

Интересно отметить, что полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных авторами, для процесса получения трубных заготовок из чугуна методом непрерывного литья намораживанием. Например, при литье трубной заготовки диаметром 108 мм в кристаллизатор высотой 160 мм со средней скоростью 0,017 м/с (время затвердевания отливки 9,4 с) плотность теплового потока на фронте затвердевания, рассчитанная по тепловому балансу, изменяется от $5,4 \cdot 10^5$ Вт/м² в нижней зоне до $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² в верхней части кристаллизатора (в конце процесса затвердевания отливки).

Таким образом, анализ гидродинамики расплава в кристаллизаторе в различные периоды затвердевания отливки и процесса теплообмена на границе раздела фаз показал существенную роль теплового и размывающего действия циркуляционных потоков в жидкой ванне кристаллизатора на кинетику затвердевания металла. Рост коэффициента теплоотдачи α , определяется увеличением скоростей потоков расплава вблизи фронта затвердевания. Повышение α , на границе раздела фаз замедляет скорость нарастания корочки. Следствием этого является неравномерный темп намораживания твердой корки в различных зонах по высоте кристаллизатора и соответственно получение неравномерной толщины стенки отливки вдоль ее образующей.

Проведенный анализ показывает, что, изменяя схему подачи металла в кристаллизатор, можно формировать циркуляционные потоки в жидкой ванне таким образом, чтобы исключить локальный размыв затвердевающей корки и соответственно уменьшить разностенность отливки.

Установлено, что при литье заготовок диаметром более 100 мм периферийная подача металла обеспечивает наиболее благоприятный характер и интенсивность потоков расплава и способствует получению отливок с равномерной толщиной стенки. Полученные результаты позволяют определить оптимальную схему заполнения кристаллизатора, параметры технологической оснастки и режимы литья для минимизации разностенности отливок и стабилизации процесса разливки.

Литература

1. Специальные способы литья: Справ. / Под ред. В. А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991.
2. Соколов Л. А., Тарасенко А. И., Гусенков Ю. А. Исследование влияния изменения коэффициента теплоотдачи на границе раздела фаз на кинетику кристаллизации слитка. Непрерывное литье стали. Тематический отраслевой сборник. М.: Металлургия, 1978. № 5. С. 15–20.
3. Боршанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И., Федынский О. С. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967.
4. Юдаев Б. Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1973.
5. Акименко А. Д., Скворцов А. А., Ульянов В. А., Рукавишников Л. Г. Конвективная теплоотдача от расплавленных металлов при температурах, близких к температурам затвердевания. Непрерывное литье стали. Тематический отраслевой сборник. М.: Металлургия, 1978. № 5. С. 84–87.
6. Бевза В. Ф., Мазько В. С., Стеценко В. Ю., Попов В. Б. Циркуляция расплава в кристаллизаторе. Деп. в ВИНТИ 02.10.85, № 6939-В.
7. Леви Л. И., Клецкин Я. Г. Жидкотекучесть чугуна // Литейное производство. 1972. № 3.
8. Баранов О. А., Ветров Б. Г., Поль В. П. и др. Непрерывное литье чугуна. М.: Металлургия, 1968.
9. Комаров О. С. Формирование структуры чугуновых отливок. Мн.: Наука и техника, 1977.
10. Захарченко Э. В., Левченко Ю. Н., Горенко В. Г., Вареник П. А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: Наукова думка, 1986.
11. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.; Л.: Машиностроение, 1966.
12. Рукавишников Л. Г. Исследование формирования стальных слитков и теплопередачи при затвердевании. Горький: Горьков. политехн. ин-т. 1973. Т. XXIX, Вып. 23. С. 67–70.