

УДК 621.7.014

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ВОЛОКОН ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ СТРУИ РАСПЛАВА ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

М. Н. ВЕРЕЩАГИН⁺, Д. Л. СТАСЕНКО

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

Представлены результаты получения дискретного волокна из сплава на основе системы Fe–B–Si–C при диспергировании струи расплава газовым потоком на поверхность вращающегося кристаллизатора. Показано, что скорость вращения кристаллизатора оказывает наибольшее влияние на размеры получаемых изделий. Проведен теоретический анализ процесса растекания частиц расплава по поверхности кристаллизатора.

Введение

Проницаемые материалы широко используются в технике и других отраслях народного хозяйства. Методами порошковой металлургии из металлов и их соединений получают пористые порошковые материалы (ППМ), пористые волоконные материалы (ПВМ), комбинированные пористые проницаемые материалы (КППМ) и др. [1].

ПВМ существенно прочнее ППМ, их пластичность и сопротивление ударным нагрузкам на порядок выше, чем у порошковых объектов. Предельно достижимая пористость ПВМ лежит в пределах 85÷95% в зависимости от размера волокна. Проницаемость данных материалов в 8–10 раз выше порошковых при прочих равных условиях. Однородность структуры ПВМ обуславливает высокий уровень физико-механических и гидравлических свойств. ПВМ, имея гибкий характер связи между волокнами, обладают меньшим термическим расширением (на 12÷16%) по сравнению с беспористыми материалами. Специфика структуры и высокий уровень служебных свойств изделий обуславливают возможность их применения в новой технике. В области композиционных материалов перспективным является использование быстрозакаленных волокон для создания волоконных композиционных материалов, прочность которых в значительной мере зависит от свойств дискретного волокна.

Основные технологические трудности при создании вышеназванных материалов связаны с получением дискретных и непрерывных волокон. В данной работе представлен один из вариантов

технологии получения дискретных волокон методом быстрой закалки расплава.

Цель работы – исследование процесса получения дискретных волокон при диспергировании расплава самофлюсующегося сплава на основе системы Fe–Cr–B–Si–C ПВК газовым потоком.

Методика исследований

В качестве исходного материала для получения дискретного волокна использовался сплав системы Fe–B–Si–C следующего состава, мас. %: железо-основа; бор – 2,5÷3; кремний – 2,0÷2,5; углерод – 0,4÷0,6.

Плавление производилось токами высокой частоты. Слив струи расплава осуществляли в центральное отверстие распылительной форсунки. К каналам распылительного устройства подводился газ-энергоноситель. Распыленный в форсунке расплав охлаждался на торцевой перфорированной поверхности кристаллизатора, введенного в полость нижнего фланца распылительного устройства. Кристаллизатору придавалось вращательное движение с частотой 4,5÷6,0 тыс. об/мин. Контроль за частотой вращения кристаллизатора осуществляли при помощи тахометра с точностью 1 об/мин.

Размер получаемых изделий определяли путем отсева в наборе микропрецизионных проволочных сит на специальном встряхивающем устройстве в течение 30 мин с последующим определением массы каждой фракции при помощи аналитических весов. Форма полученных частиц изучалась с использованием оптического микроскопа «Neophot-21».

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

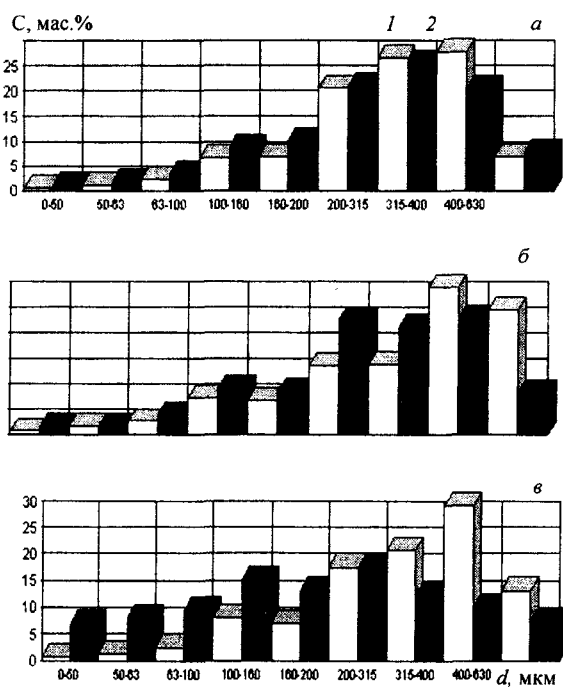


Рис. 1. Диаграммы распределения волокон по приведенному диаметру d : a – при ширине пазов кристаллизатора $h_p = 0$ мм; b – 1; v – при $h_p = 3$ мм; при частоте вращения кристаллизатора 1 – 4500 об/мин, 2 – 6000 об/мин

Результаты исследований

Исследования показали, что конечные размеры получаемых частиц зависят от ряда факторов, таких как: частота вращения кристаллизатора, ширина пазов, перегрев расплава и др. Наибольшее влияние на геометрические размеры получаемых частиц оказывает частота вращения кристаллизатора (рис. 1), причем с увеличением частоты вращения до 6 тыс. об/мин при ширине пазов 3 мм имеет место увеличение доли частиц с приведенным диаметром < 160 мкм. Длина получаемых дискретных волокон при этом составляет примерно $(3+8)d$, где d – приведенный диаметр волокна.

Выполненный оптический анализ формы полученных изделий свидетельствует, что при диспергировании расплава на поверхность вращающегося кристаллизатора волокна приобретают удлиненную цилиндрическую форму с заостренными концами (рис. 2), однако присутствуют и частицы с формой близкой к сферической. Это, по-видимому, связано с тем, что не все капли диспергируемого расплава полностью кристаллизуются на поверхности вращающегося кристаллизатора.

Получение дискретного волокна диспергированием расплава при его кристаллизации на торцевой поверхности кристаллизатора требует учета влияния тепловых и механических воздействий. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки теоретических основ процессов, происходящих при получении дискретного волокна и их влияния на конечные размеры получаемых из-

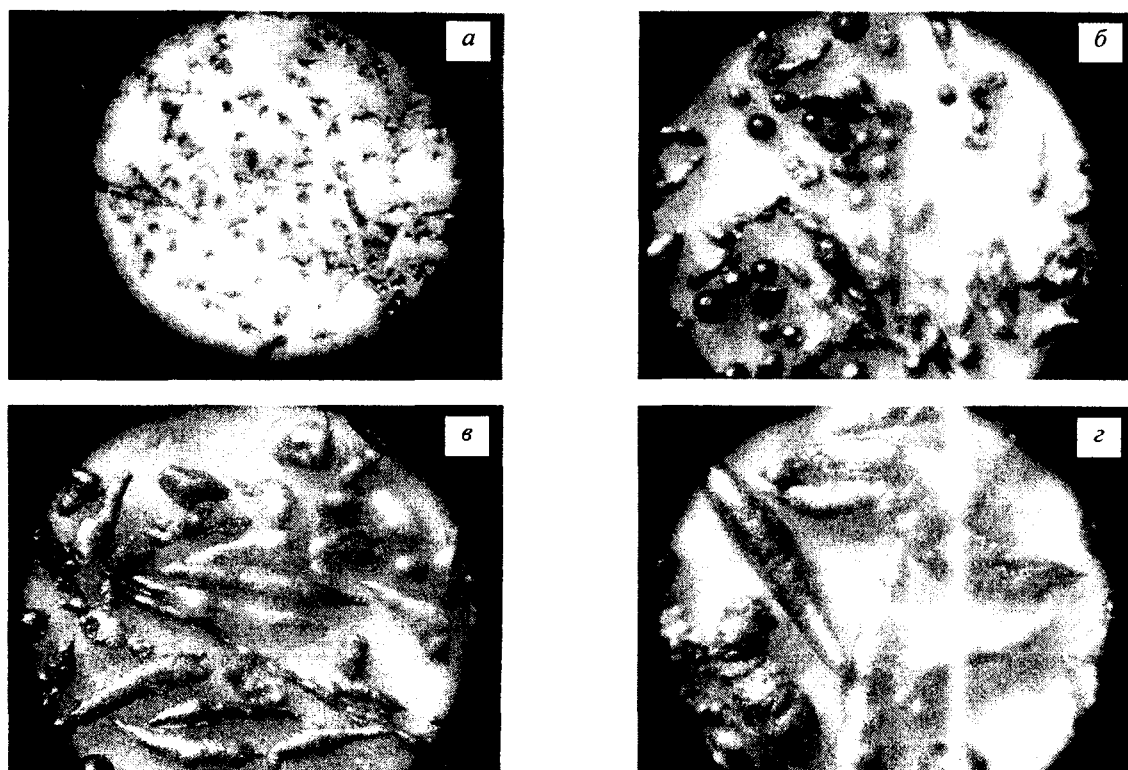


Рис. 2. Дискретное волокно различных фракций ($\times 100$): a – фракция > 50 мкм; $б$ – $50+63$; $в$ – $63+100$; $г$ – фракция $100+160$ мкм

делий. Процесс получения дискретного волокна на торцевой поверхности вращающегося кристаллизатора можно условно разделить на следующие характерные последовательные этапы: диспергирование расплава ПВК газовым потоком, вторичное дробление капель, растекание капель по поверхности до размеров волокна.

Процесс диспергирования ПВК газовым потоком рассмотрен в работе [2].

В первом приближении необходимым условием растекания жидкости по поверхности твердого тела является выполнение известного неравенства:

$$\sigma_T \geq \sigma_{ж} + \sigma_{T-ж},$$

где σ_T , $\sigma_{ж}$, $\sigma_{T-ж}$ – свободные поверхностные энергии твердого тела, расплава на границе с окружающей средой и на их границе друг с другом.

Однако данное соотношение не дает точного ответа на вопрос – будет ли расплавленный металл растекаться по поверхности твердого тела, т. е. в реальных условиях свободная поверхностная энергия σ_T , $\sigma_{T-ж}$ может изменяться в широких пределах вследствие взаимодиффузии компонентов, изменения химического состава и структуры поверхностного слоя. Кроме того, это соотношение не учитывает микрорельеф твердой поверхности, который также играет большую роль в явлениях смачивания и растекания.

Процесс растекания капель расплавов по твердой поверхности можно условно разделить на три последовательные стадии. На начальной стадии капля под воздействием капиллярных сил и силы тяжести превращается в плоскую «лужицу». Затем происходит дальнейшее растекание жидкости со степенной зависимостью расстояния от времени. На последней стадии скорость растекания быстро уменьшается и растекание прекращается. На второй стадии процесса растеканию расплава препятствует главным образом вязкое сопротивление жидкого металла. При этом закон перемещения фронта жидкого металла описывается соотношением:

$$X = (3m\Delta\sigma/2\eta\rho_L\xi)^{1/3} t^{1/3},$$

где X – расстояние от центра капли с массой m ; η , ρ_L – вязкость и плотность жидкого металла; ξ – коэффициент, учитывающий неоднородность толщины слоя расплава ($\xi = 10$), t – время.

Данное соотношение справедливо при условии подчинения вязкого сопротивления жидкости уравнению Ньютона и постоянства теплофизических характеристик расплава в данный момент процесса.

Процесс растекания делится на кинематический и диффузионный этапы. В первом случае имеет место перемещение периметра смачивания под действием тянущего усилия $\Delta\sigma$, а второй характеризует доставку массы жидкости к периметру смачивания за счет объемных сил.

При изотермическом процессе термодинами-

ческая сила $\Delta\mu$ определяет тянущее усилие $\Delta\sigma$ на периметре смачивания:

$$\Delta\mu = \Delta\sigma = \sigma_T - \sigma_{T-ж} - \sigma_{ж} \cos\Theta. \quad (1)$$

Скорость перемещения жидкого металла с учетом выражения (1) описывается следующим уравнением:

$$V = k\Delta\sigma,$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый в начальный момент по скорости растекания V_0 и углу смачивания $\Theta = \Theta_0$. Теоретический анализ полной системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [3] показывает, что кинетика растекания тонкого слоя расплава при $\delta \ll r$ описывается уравнением:

$$r = (4\Delta\sigma m / \pi \mu \rho \alpha)^{1/4} t^{1/4}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma = k_1(\sigma_T - \sigma_{ж}) - \sigma_{ж}$, k_1 – коэффициент шероховатости подложки; m – масса капли расплава; μ , ρ – вязкость и плотность расплава; δ – толщина слоя; $\alpha > 1$ – поправочный коэффициент, учитывающий повышение гидравлического сопротивления слоя. Уравнение (2) справедливо при выполнении условий квазистационарности ($t \gg \rho\mu\delta^2$) и безинерционности ($Re \ll r\delta$).

Скорость перемещения фронта жидкости равна:

$$\begin{aligned} dr/dt &= \Delta\sigma m / \pi \alpha \mu \rho l / r^3 - \\ &- \Delta\sigma C_s \sqrt{D_v \pi} / 2 \alpha \mu \rho \sqrt{t} / \rho, \end{aligned}$$

где D_v – коэффициент объемной диффузии расплава в тело кристаллизатора; C_s – концентрация диффузионного вещества в поверхностном слое кристаллизатора, что следует из выражения

$$\Delta r = \sigma_{ж} (\cos\theta_0 - \cos\theta).$$

Время Δt , необходимое для стекания жидкости на новый кольцевой участок шириной Δr , находится из соотношения Δr , представленного выше, при этом от фронта жидкости оторвется n_a атомов:

$$n_a = \Delta t / t_0 n_0 e^{n_s/k_2 T} = (\alpha \mu r \Delta r \pi / \Delta \sigma \delta t_0 b) e^{n_s/k_2 T},$$

где t_0 – период колебания атомов; n_s – энергия активации поверхностной диффузии; $n_0 = 2\pi r/b$ – число атомов на фронте жидкого металла; b – диаметр атомов; k_2 – постоянная Больцмана; T – температура. Отсюда $C_s = n_a / 2\pi r \Delta r$. В случае малых значений C_s , снижение поверхностной энергии $\Delta\sigma_a \approx \gamma C_s$, γ – поверхностная активность жидкого металла по отношению к твердой подложке).

Для анализа кинематики растекания жидких металлов по поверхности кристаллизатора в некоторой окружающей среде, необходимо решение следующего уравнения:

$$\ddot{a} + \dot{a}^2/a + 8\eta\dot{a}/r^2\rho - 2(\sigma_{12} - \sigma_{13})/r\rho a = 0, \quad (3)$$

где a – перемещение расплава; \dot{a}, \ddot{a} – скорость и ускорение расплава; ρ, η – плотность и вязкость жидкости; σ_{ij} – удельная свободная межфазовая энергия на границе между i -й и j -й фазами.

Решение дифференциального уравнения (3) дает выражение:

$$a^2 = [4(\sigma_{12} - \sigma_{13})/r\rho] r^2 \rho / 8\eta \left[t + e^{(-8\eta/r^2\rho - 1)} / 8\eta / r^2 \rho \right].$$

Уравнение, описывающее движение капли жидкости при растекании по гладкой поверхности в некоторой окружающей среде, имеет вид:

$$m\ddot{a} = f_1 - f_2, \quad (4)$$

где $f_1 = -dn/da$; n – свободная энергия системы пластина-капля; f_2 – сила вязкого сопротивления.

Принимая растекающуюся каплю в виде утончающегося параллелепипеда высотой $Z = m/(x\rho a)$, имеем выражения для площади поверхности растекающейся капли и ее потенциальной энергии в поле силы тяжести:

$$S = xa + 2Za + 2Zx; n_1 = (mgZ)/2.$$

Сила вязкого сопротивления находится из соотношения [4]:

$$f_2 = (\alpha\eta x^2 \rho / 2m) a^2 (da/dt).$$

Пренебрегая инерционными силами $m\ddot{a}$ и подставляя полученные соотношения в уравнение (4), имеем:

$$(\alpha\eta x^2 / 2m) a^2 (da/dt) = \Delta\sigma + (m/x\rho a^2) (2\sigma_{23} + mg/2x),$$

где $\Delta\sigma$ играет роль «движущей силы» растекания для тонкого слоя металла, находящегося в жидком состоянии; $2\sigma_{23} m/x\rho a^2$ – сокращение площади переднего и заднего торцов капли в процессе ее растекания; $m^2 g/2\rho x^2 a^2$ – понижение центра тяжести растекающегося расплава.

Решение данного уравнения относительно времени растекания расплава по поверхности кристаллизатора имеет вид:

$$t = \frac{\alpha\eta x}{2m\Delta\sigma} \left\{ \frac{\frac{\alpha\eta x}{2m\Delta\sigma} a^2 da}{1 + \left[\frac{m(2\sigma_{23} + mg/2x)}{\rho x \Delta\sigma} \right] / x^2} + \frac{\alpha\eta x}{2m\Delta\sigma} \left[\frac{m(2\sigma_{23} + mg/2x)}{\rho x \Delta\sigma} \right]^{3/2} \right\}.$$

Если предположить, что температура распла-

ва постоянна до окончания кристаллизации и приобретения пленкой расплава конечной формы, то процесс утонения пленки расплава можно рассматривать с момента принятия каплей формы цилиндра с квадратным осевым сечением высотой h_0 и объемом $V = (\pi h_0^3)/4$.

Сила трения на единицу поверхности слоя в радиальном направлении выражается соотношением:

$$f_2 = v(\text{Re})^n \partial v_r / \partial h, \quad (5)$$

где v – кинематическая вязкость расплава; v_r – радиальная составляющая скорости; Re – число Рейнольдса, определяющее границу между ламинарным и турбулентным течениями; $\text{Re} = \rho(v_r h / \eta)$.

При соблюдении условия диффузии жидкого металла с поверхностью кристаллизатора и допуская, что $v_r \approx h^2$, при постоянстве объема растекающейся капли расплава, исходя из выражения (5), можно получить выражение для радиальной составляющей скорости следующего вида:

$$v_r = -R/2h(dh/dt),$$

где $1/2(dh/dt)$ – скорость перемещения центра тяжести растекающейся капли расплава; R – радиус пленки жидкого металла.

При увеличении радиуса образующейся пленки расплава на величину dR силы вязкого сопротивления совершают работу $d\varepsilon = f_2 dR$ (на единицу площади). Тогда скорость диссипации первоначальной кинетической энергии можно представить в виде:

$$d\varepsilon/dt = 2^{-(n+2)} \rho^n v^{1-n} h^{-3} R^{n+2} (-dh/dt)^{n+2}, \quad (6)$$

где n – показатель, характеризующий режим растекания. Кинетическую энергию, необходимую для перевода сферической капли в тонкую пленку на охлаждающей поверхности кристаллизатора можно найти следующим образом:

$$E = 2^2 \rho V \left(\frac{1}{2} \frac{dh}{dt} \right)^2 / 2,$$

а работу –

$$dA' = 2\pi R dRe'.$$

С учетом выражения (8) работа, совершаемая по переводу сферической капли в тонкую пленку на поверхности кристаллизатора, равна:

$$A = 2^{-(n+1)} \pi \rho^4 h_0^{-9} v^{1-n} \left(-dh/dt \right)^{n+2} \frac{R^{n+10}}{(n+10)}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует формула для определения скорости полета капли:

$$v_0^{1-n} = 2^{-(2n-1)} / (n+10) (v/\rho h_0)^{1-n} \times 2 / (n+8) \left(-2h_0^{n+8/2} + h_0^{n-8/2} h_0^{n+8/2} \right). \quad (8)$$

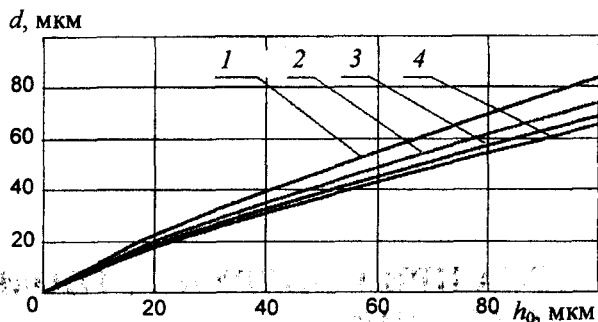


Рис. 3. Зависимость приведенного диаметра, дискретного волокна от исходных размеров капли расплава при скорости полета капли расплава v_0 : 1 – 2 м/с, 2 – 4, 3 – 6, 4 – 8 м/с

Учитывая, что $h \ll h_0$, выражение (8) примет следующий вид:

$$v_0^{1-n} = \frac{(1-n)2^{-(2n-1)}}{(n+10)(n+8)} \left(\frac{v}{\rho h_0} \right)^{1-n} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{n+8/2} \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определять конечные размеры растекающейся по поверхности кристаллизатора капли расплава ($h \approx d$, где d – приведенный диаметр волокна).

На рис. 3 представлены зависимости приведенного диаметра дискретного волокна из сплава системы Fe-Si-B-C в зависимости от исходных размеров капли при различных скоростях их полета.

Можно видеть, что с увеличением исходных размеров капли h_0 увеличивается приведенный диаметр дискретного волокна d , а с увеличением скорости полета капли v_0 приведенный диаметр дискретного волокна уменьшается. Таким образом, для получения наименьших по приведенному диаметру волокон необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность кристаллизатора, имели минимальные размеры, а скорость их полета была максимальной.

Заключение

При диспергировании расплава на поверхность вращающегося кристаллизатора газовым потоком ширина пазов кристаллизатора оказывает ключевое влияние на дисперсность получаемых частиц. Частицы, полученные данным способом, имеют ровную и гладкую поверхность, что позво-

ляет рекомендовать использовать этот метод распыления для получения частиц малых размеров цилиндрической формы (дискретное волокно).

Обозначения

$\sigma_T, \sigma_{ж}, \sigma_{T-ж}$ – свободные поверхностные энергии твердого тела, расплава на границе с окружающей средой и на их границе друг с другом; X – расстояние от центра капли с массой m ; η, ρ_L – вязкость и плотность жидкого металла; ξ – коэффициент учитывающий неоднородность толщины слоя расплава; $\Delta\sigma$ – тянущее усилие; $\Delta\mu$ – термодинамическая сила; k – коэффициент пропорциональности; V_0 – скорость растекания; Θ – угол смачивания; k_1 – коэффициент шероховатости подложки; m – масса капли расплава; δ – толщина слоя; α – поправочный коэффициент, учитывающий повышение гидравлического сопротивления слоя; D_v – коэффициент объемной диффузии расплава в тело кристаллизатора; C_s – концентрация диффузионного вещества в поверхностный слой кристаллизатора; Δt – время, необходимое для стекания жидкости на новый кольцевой участок; Δr – ширина нового кольцевого участка; t_0 – период колебания атомов; n_s – энергия активизации поверхностной диффузии; n_0 – число атомов на фронте жидкого металла; b – диаметр атомов; κ_2 – постоянная Больцмана; T – температура; n_a – число атомов, оторвавшихся от фронта жидкости; a – перемещение расплава; \dot{a}, \ddot{a} – скорость и ускорение расплава; σ_{ij} – удельная свободная межфазовая энергия на границе между i -й и j -й фазами; n – свободная энергия системы пластина-капля; f_2 – сила вязкого сопротивления; ν – кинематическая вязкость расплава; ν_r – радиальная составляющая скорости; Re – число Рейнольдса; R – радиус пленки жидкого металла; n – показатель, характеризующий режим растекания; d – приведенный диаметр волокна, C – концентрация волокон.

Литература

1. Пористые проницаемые материалы. Под ред. Белова С. В. М.: Металлургия (1987)
2. Верещагин М. Н., Стасенко Д. Л. Особенности диспергирования струи расплава газовым потоком со сложным движением // Материалы, технология, инструменты (2001), № 1
3. Рауд Э. А., Сумм Б. Д. / Докл. АН СССР. 205 (1972), 1131
4. Быковский А. И., Пролесковская А. Ю. Поверхностная диффузия и растекание. М.: Наука (1963)

Vereschagin M. N., Stasenko D. L.

Research of features of obtaining of discrete fibrous at a dispersion of a spray of a melt by a gas stream.

The outcomes of researches of obtaining of a discrete fiber from alloy are submitted on the basis of a system Fe-B-Si-C at a dispersion of a spray of a melt by a gas stream on a surface of a rotated crystallizer. It is noted, that the rotation rate of a crystallizer renders the greatest influencing on the sizes of received items. The idealized analysis of process of influence of fragments of a melt on a surface of a crystallizer is conducted.

Поступила в редакцию 21.04.2001.

© М. Н. Верещагин, Д. Л. Стасенко, 2002.