

Д. т. н. К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, к. т. н. О. А. Филатова,
д. т. н. Виктор В. Точилкин (✉)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

УДК 621.746.047:669.054.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА И КОНСТРУКЦИИ ОГНЕУПОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ – ОТКРЫТАЯ СТРУЯ – КРИСТАЛЛИЗАТОР СОРТОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрены процесс движения потоков стали и огнеупорные конструкции системы промежуточный ковш (ПК) – открытая струя (ОС) – кристаллизатор сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Отмечены особенности управления потоками металла в исследуемой системе. Представлены особенности конструкции элементов сортовой МНЛЗ, которые обеспечивают рациональное прохождение разливаемого металла в системе ПК – ОС – кристаллизатор. Усовершенствование конструкции обеспечило рациональное движение потоков жидкого металла в кристаллизаторе и создало условия для повышения качества сортовой заготовки.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, промежуточный ковш, кристаллизатор, математическое моделирование, потоки металла, огнеупорные конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование огнеупорных конструкций [1], обеспечивающих движение потоков жидкого металла из сталеразливочного ковша [2] в промежуточный ковш (ПК) [3] и далее в кристаллизатор сортовой МНЛЗ [4] открытой струей (ОС) (рис. 1) [4, 5] создает условия для рациональной и безаварийной работы сортовой МНЛЗ. Определяющую роль здесь играет система ПК – ОС – кристаллизатор [4].

Система ПК – ОС – кристаллизатор и ее элементы [4] обеспечивают рациональное движение потоков жидкой стали в ПК [6, 7] и затем в кристаллизаторе [8]. Непрерывную разливку жидкого металла в сортовых МНЛЗ обеспечивают двумя способами: открытой струей (без защитного погружаемого стакана) и закрытой струей (с использованием защитного погружаемого стакана) [8, 9]. Разливка жидкой стали из ПК в кристаллизатор открытой струей наиболее широко применяется на высокоскоростных сортовых МНЛЗ [4, 9].

Оборудование для разливки ОС разливочного отверстия ПК и кристаллизатор являются важнейшими компонентами системы ПК – ОС – кристаллизатор [10].

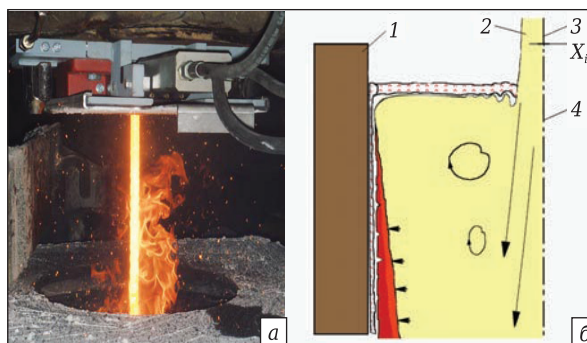


Рис. 1. Подача стали в кристаллизатор сортовой МНЛЗ открытой струей: а — общий вид; б — компоновка подсистемы открытая струя – кристаллизатор; 1 — гильза кристаллизатора; 2 — открытая струя; 3 — центральная ось открытой струи; 4 — ось кристаллизатора; X_i — смещение оси кристаллизатора относительно оси открытой струи

В кристаллизаторе жидкая сталь, непрерывно подаваемая через конструкции разливочного отверстия из ПК открытой струей, кристаллизуется по внутренней поверхности сортовой заготовки, и на выходе из кристаллизатора оболочка из затвердевшего металла образует полость с жидким металлом, внутри которой в направлении от стенок к центру продолжается кристаллизация [11]. Смещение оси ОС от центральной продольной оси кристаллизатора влияет на параметры разливки и качество непрерывно-литой заготовки [11, 12].



Виктор В. Точилкин
E-mail: toch56@mail.ru

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 2 показан комплект огнеупорного оборудования разливочного отверстия при перемещении стали ОС [9, 10]. Данный комплект обеспечивает подачу ОС стали в кристаллизатор сортовой МНЛЗ.

Основное условие совместного размещения на сортовой МНЛЗ оборудования разливочных отверстий ПК и кристаллизатора — обеспечение совпадения осей ОС стали и кристаллизатора ($x_i = 0$) или работа системы ПК – ОС – кристаллизатор сортовой МНЛЗ со значениями смещений x_i в пределах допустимых (x_d) технологическими требованиями

$$x_i \leq x_d,$$

где x_i — смещение оси кристаллизатора относительно оси ОС; x_d — допустимые значения смещений оси кристаллизатора относительно оси ОС.

Расположение оси ОС стали определяют расположением огнеупорного оборудования разливочного отверстия в корпусе ПК [13], а также износом отверстий гнездового блока и стакан-дозатора в процессе разливки металла [10].

Для оценки особенностей процесса разливки в системе ПК – ОС – кристаллизатор при различных значениях смещения осей ОС и кристаллизатора x_i (см. рис. 1) проведено математическое моделирование [14].

С использованием пакета программ твердотельного моделирования [14] была построена модель внутреннего объема металла [5], перемещающегося через огнеупорные вставки разливочного отверстия ПК открытой струей в верхнюю часть кристаллизатора сортовой МНЛЗ [9]. Для каждого случая модель делили на конечные элементы. Количество элементов варьировали

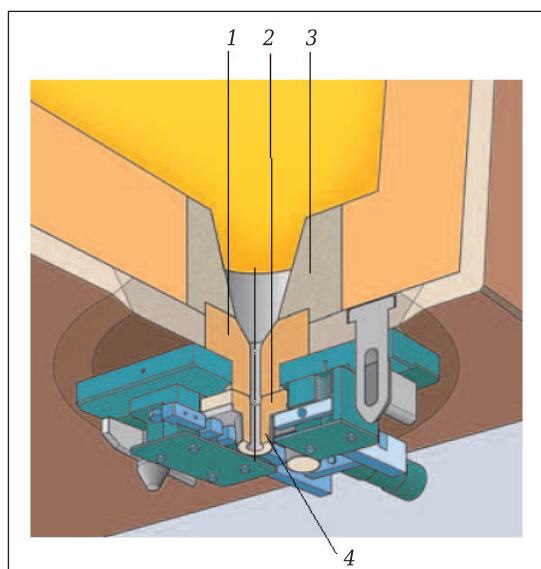


Рис. 2. Комплект огнеупорного оборудования разливочного отверстия: 1 — гнездовой блок; 2 — стакан-дозатор; 3 — набивная смесь; 4 — втулка стакан-дозатора

в зависимости от сложности и компоновки конструкции рассчитываемой системы ПК – ОС – кристаллизатор [14].

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПК – ОС – КРИСТАЛЛИЗАТОР ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

При составлении модели [14] использованы следующие уравнения: в качестве уравнения, описывающего движение жидкости в области моделирования, принимаем уравнение Навье – Стокса для нестационарных потоков жидкости (жидкого металла), неразрывности потока [5, 14].

Геометрия модели определяется компоновкой оборудования разливочного отверстия ПК и расположением кристаллизатора относительно струи жидкой стали. Масштаб модели составлял 1:1. Соответствующие уравнения имеют вид [5, 14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}$ — вектор скорости жидкости; $\vec{F}$ — вектор объемных сил; ρ — плотность стали; p — давление жидкости; ∇p — градиент давления; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ — лапласиан $\vec{u}$.

Вектор объемных сил с учетом действующего гравитационного поля Земли определяют в выбранной системе координат как

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \cdot g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения.

При расчете турбулентных течений металла в кристаллизаторе используют $(k - \epsilon)$ -модель турбулентной вязкости [5, 14]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнения Навье – Стокса, включает молекулярную μ и турбулентную вязкости μ_T . При этом к основным уравнениям (1) и (2) добавляются два дополнительных уравнения: уравнение распространения турбулентной кинетической энергии k :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon$$

и уравнение развития скорости диссипации турбулентной энергии ϵ :

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \cdot \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k},$$

где C_{μ} , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ — эмпирические коэффициенты; k — кинетическая энергия турбулентного потока; ∇k — градиент кинетической энергии турбулентного потока; $\nabla \epsilon$ — градиент скорости диссипации турбулентной кинетической энергии.

гии; P_k — член генерации; ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии.

Значения эмпирических коэффициентов приведены ниже:

C_{η}	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0,99	1,44	1,92	1	1,3

В математической модели процесса разлива металла были сделаны допущения:

1. Моделируемый процесс протекает в объеме, ограниченном контуром области моделирования.

2. Жидкость является вязкой и несжимаемой.

3. Скорость истечения жидкости из сталеразливочного ковша в ПК задана и постоянна.

4. Расход стали из ПК открытыми струями в кристаллизаторы равен расходу жидкости из сталеразливочного ковша в ПК.

Математическое моделирование осуществляли с учетом начальных и граничных условий. Начальные условия дополняют уравнения (1): температура металла в промежуточном ковше 1555 °С, скорость вытягивания заготовки 2,8 м/мин, динамическая вязкость стали 0,006 Па·с.

РАСЧЕТНАЯ СЕТКА

Каждую модель делили на конечные элементы [5, 14]. Количество элементов варьировали от 43399 до 43486 в зависимости от смещения осей. Количество конечных элементов после разбиения модели при различных значениях смещения осей представлено ниже:

Модель ПК – кристаллизатор — смещение осей ПК и кристаллизатора, мм	Количество конечных элементов сетки
0	43486
1,5	43399
2,5	43423
5	43418
7,5	43429

Сеточная математическая модель системы ПК – ОС – кристаллизатор и отдельных ее элементов представлена на рис. 3.

Граничные условия (границы отмечены на рис. 3)

На входе расчетной области задали начальную скорость потока металла для сечения заготовок 150×150 мм $\vec{u} = 1,11$ м/с.

На жидкую сталь, находящуюся вблизи твердых поверхностей (стенок), действует пристеночное прилипание

$$\vec{u} = 0. \quad (3)$$

Данное граничное условие устанавливают на все внутренние стенки ПК, поверхности защитной трубы, стакана-дозатора.

Вдоль плоскости симметрии задали условие

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0, \quad (4)$$

где $\vec{n}$ — орт, перпендикулярный к свободной поверхности или плоскости симметрии.

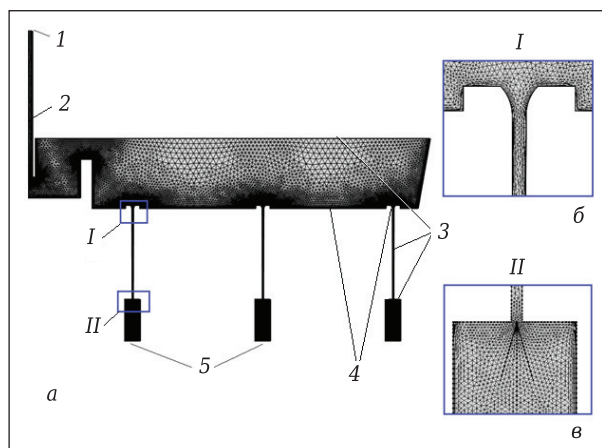


Рис. 3. Сеточная математическая модель: а — модель ПК (правая часть, отделенная и развернутая по плоскости симметрии, — ось центрального ручья); б — разливочное отверстие ПК — вид I; в — верхняя часть кристаллизатора — вид II; 1 — вход расчетной области — начало защитной трубы, закрепленной на сталеразливочном ковше; 2 — плоскость симметрии ПК; 3 — свободные поверхности (зеркало металла в ПК, кристаллизаторе, свободная поверхность открытой струи); 4 — область нахождения жидкой стали вблизи твердой поверхности (стенок) — разливочного отверстия и дна ПК; 5 — выход из расчетной области

На свободных поверхностях (зеркало металла в ПК, кристаллизаторе, свободная поверхность ОС) задали условие прилипания

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0. \quad (5)$$

На выходе расчетной области целесообразно задавать давление жидкости, как правило, нулевое $p = p_0 = 0$ Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ ПК – ОС – КРИСТАЛЛИЗАТОР

Параметрами течения ОС из разливочного отверстия ПК в кристаллизатор и далее движения затопленных струй жидкой стали в самом кристаллизаторе являются векторы скоростей в поперечной плоскости кристаллизатора. На рис. 4 показаны картины линий тока, на рис. 5 — векторов скоростей потоков металла в продольном сечении кристаллизатора при различных смещениях осей кристаллизатора и ОС стали.

При отсутствии смещения осей поток металла равномерно перемещается вдоль кристаллизатора, линии тока симметричны относительно его оси.

При смещении осей линии тока сдвигаются в противоположную сторону от стенки кристаллизатора, что приводит к возникновению скоростных потоков у стенок и размыву корочки слитка. При больших линейных смещениях значительно увеличивается разность величин скоростей у правой и левой стенок кристаллизатора. Эта

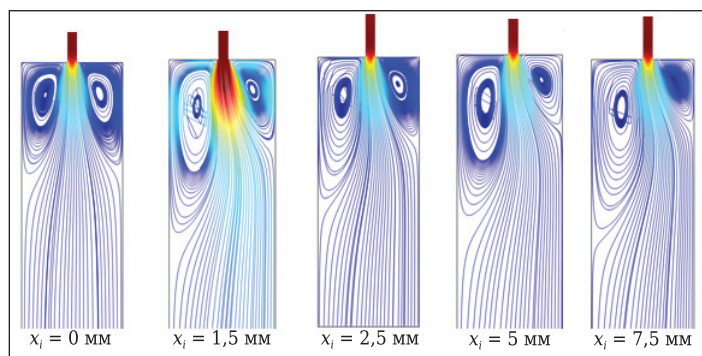


Рис. 4. Линии тока жидкой стали в кристаллизаторе

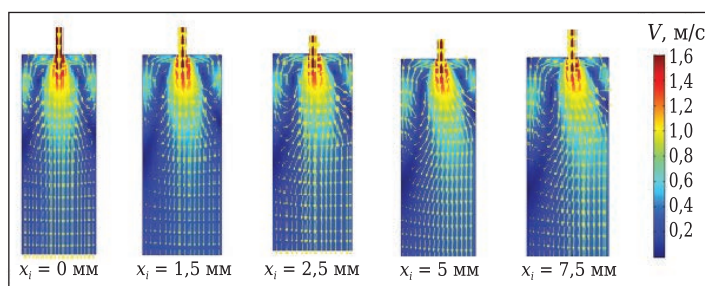


Рис. 5. Векторы и поля скоростей жидкой стали в кристаллизаторе

Библиографический список

1. **Вдовин, К. Н.** Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 3–7.

Vdovin, K. N. Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, I. M. Yachikov // Refract. Indust. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 569–573. DOI: 10.1007/s11148-016-9889-6

2. **Вдовин, К. Н.** Новые вставки из пластичных огнеупоров для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 41–43.

Vdovin, K. N. New plastic refractory linings for protecting a metal stream during pouring into a CBCM / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, O. A. Marochkin [et al.] // Refract. Indust. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320. DOI: 10.1007/s11148-014-9716-x

3. **Точилкин, В. В.** Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / В. В. Точилкин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2007. — № 2. — С. 5–7.

4. **Смирнов, А. Н.** Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.

5. **Вдовин, К. Н.** Проектирование цехов сталеплавильного производства : учебник / К. Н. Вдовин, В. Ф. Мысик, В. В. Точилкин, Н. А. Чиченев. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2016. — 505 с.

6. **Вдовин, К. Н.** Рафинирование металла в промежуточном ковше / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, М. В.

разница при рассчитанном максимальном смещении составляет 1,43 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена система ПК – ОС – кристаллизатор для подвода металла ОС в кристаллизатор с рациональной установкой конструкций разливочного отверстия ПК [15] относительно оси кристаллизатора сортовой МНЛЗ, что позволяет повысить качество сортовой непрерывно-литой заготовки за счет уменьшения несимметричности потоков стали относительно центральной оси сортового кристаллизатора и равномерного их распределения по его сечению.

Равномерное распределение потоков стали приводит к снижению скоростей струй жидкой стали у стенок кристаллизатора в области кристаллизующегося слитка, что обеспечивает рациональные условия для развития затвердевающей непрерывно-литой сортовой заготовки, имеющей небольшие сечения. Это также обеспечивает создание заданной корочки [9] сортовой заготовки и уменьшает возможность аварийных ситуаций — прорывов в процессе эксплуатации.

Семенов, А. Н. Русаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2007. — № 1. — С. 43–46.

7. **Вдовин, К. Н.** Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Виктор В. Точилкин, Василий В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 3–5.

Vdovin, K. N. Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four-strand continuous caster / K. N. Vdovin, Viktor V. Tochilkin, Vasilii V. Tochilkin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 6–8. DOI: 10.1007/s11148-016-9916-7

8. **Гущин, В. Н.** Особенности подвода расплава в кристаллизаторы сортовых заготовок / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов, С. А. Балан // Известия вузов. Черная металлургия. — 2014. — № 11. — С. 31–35.

9. **Ячиков, И. М.** Моделирование роста корочки металла в сортовом кристаллизаторе при смещении струи относительно его оси / И. М. Ячиков, К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2017. — Т. 60, № 1. — С. 24–29.

10. **Вдовин, К. Н.** Сравнительный анализ применения различных систем быстрой замены стаканов-дозаторов при разливке стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, Р. И. Абдрахманов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 62–64.

11. **Сотников, А. Л.** Контроль соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической

осью МНЛЗ / А. Л. Сотников, А. А. Шоломицкий // Металлург. — 2016. — № 10. — С. 45–50.

Sotnikov, A. L. Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis / A. L. Sotnikov, A. A. Sholomitskii // Metallurgist. — 2017. — Vol. 60, № 9/10. — P. 1046–1053. DOI: 10.1007/s11015-017-0406-z

12. **Сотников, А. Л.** Анализ силового нагружения шарниров и опор механизма качения кристаллизатора сортовой МНЛЗ / А. Л. Сотников, Н. А. Родионов, С. В. Птуха // Металлург. — 2014. — № 10. — С. 51–56.

Sotnikov, A. L. Analysis of mechanical loading of the hinges and supports of the mold vibration mechanism on a continuous caster / A. L. Sotnikov, N. A. Rodionov, S. V. Ptukha // Metallurgist. — 2015. — Vol. 58, № 9. — P. 883–891.

13. **Вдовин, К. Н.** Анализ работы системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш сортовой МНЛЗ и совершенствование огнеупорных конструкций приемной камеры промежуточного ковша / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Виктор В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 5. — С. 3–5.

Vdovin, K. N. Analysis of operation of a steel-pouring ladle-tundish system for a section CBCM and improved refractory structures for the tundish receiving chamber

/ K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, Viktor V. Tochilkin // Refract. Indust. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 221–223. DOI: 10.1007/s11148-016-9956-z

14. **Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячников. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 348 с.

15. **Вдовин, К. Н.** Создание имитатора рабочей среды для повышения износостойкости огнеупоров при разливке стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 10–13.

Vdovin, K. N. Creating a stream simulator to improve the wear resistance of refractories during the casting of steel on continuous section casters / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin // Refract. Indust. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 435–437. DOI: 10.1007/s11148-014-9628-9 ■

Получено 26.11.17

© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, О. А. Филатова, Виктор В. Точилкин, 2018 г.

Предлагаю брошюры

«**Квазиизостатическое прессование керамических изделий**» — краткое содержание докторской диссертации (объем 68 с.), 1990 г., и «**Некоторые виды брака в технологии прессования керамических изделий**» (объем 71 с.), 1989 г.

Квазиизостатическое прессование как метод в технологии изостатического прессования является единственным способом трехосевого объемного прессования, не требующим дорогостоящих изостатов. Прессование осуществляется на прессах статического прессования в пресс-формах, аналогичных пресс-формам статического прессования, прессуемым материалом в которых является твердый эластичный уретан. Метод разработан в СССР впервые в мире. К 1990 г. был освоен на 19 предприятиях страны, а также в 8 странах, но в связи с перестройкой технология была утрачена.

В брошюре приведена теория квазиизостатического прессования, описаны схемы разработанных способов прессования, схемы устройства пресс-форм, их общий вид. Представлены кинетика эластичных прессующих элементов пресс-форм, формулы для расчета пресс-буферов для каждого типа изделий.

Ассортимент предлагаемых изделий: 13 наименований колец, мелющие шары, капсулы и обечайки, тигли, диски и шайбы, трубки и стержни, ребристые изоляторы. Способом квазиизостатического прессования опробована прессуемость графита, металлических порошков, стеклопорошков, ситаллов. Все материалы показали хорошую прессуемость, опрессованный полуфабрикат характеризовался высокими плотностью и механической прочностью.

Квазиизостатическое прессование обеспечивает высокое качество изделий, его производительность значительно выше, чем статического, также в несколько раз выше эксплуатационная стойкость пресс-форм.

Для возрождения утраченной технологии предлагаю указанные брошюры.

Разработчик технологии квазиизостатического прессования, кандидат химических наук

Тимохова Мария Ивановна

Контактный телефон: 8 495 613 56 20
Электронная почта: 06051961@yandex.ru