

К. т. н. И. А. Прибытков, А. Ю. Терехова (✉), С. И. Кондрашенко

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

УДК 62-719

## ИМПУЛЬСНО-СКОРОСТНОЙ СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ МАССИВНЫХ В ТЕПЛОМ ОТНОШЕНИИ ТЕЛ

Представлены данные по импульсно-скоростному интенсивному охлаждению массивных в тепловом отношении тел. Импульсно-скоростной нагрев, состоящий из чередующихся периодов интенсивного нагрева и выдержки, при котором основная доля теплоты подводится к металлу конвективным способом, предполагает повышенную скорость нагрева металла именно в период нагрева. Данный режим охлаждения существенно влияет на распределение температуры в металле в радиальном направлении в ходе охлаждения.

**Ключевые слова:** импульсно-скоростное охлаждение, массивные тела.

### ВВЕДЕНИЕ

**И**мпульсно-скоростной нагрев, состоящий из чередующихся периодов интенсивного нагрева и выдержки, при котором основная доля теплоты подводится к металлу конвективным способом, предполагает повышенную скорость нагрева металла именно в период подачи импульса. В период выдержки возможна реализация режимов, повышающих, снижающих или оставляющих неизменными во времени достигнутый уровень температуры центра [1–3]. Эффективность такого нагрева гораздо выше, чем при непрерывном подводе теплоты к нагреваемой поверхности. Аналогичные выводы справедливы и для процесса охлаждения вследствие того, что при непрерывном охлаждении новые порции охладителя поступают в зону, поверхность которой уже охладилась за счет действия охладителя, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие снижения градиента температур между металлом и охладителем [4, 5]. Для нового повышения температуры поверхностных слоев металла необходимо время, в течение которого осуществляется нагрев изнутри за счет внутренних перетоков теплоты теплопроводностью от центра к поверхности.

Работа посвящена анализу особенностей импульсного охлаждения массивного в тепловом отношении металла, реализация которого возможна в условиях применения струйного охлаждения. Импульсное охлаждение позволяет расширить возможность управления этим процессом за счет изменения таких влияющих фак-

торов, как длительность периодов интенсивного и малоинтенсивного охлаждения (выдержки), суммарная продолжительность цикла (охлаждение плюс выдержка), соотношение величин коэффициентов теплоотдачи в периоды охлаждения и выдержки [6, 7]. При охлаждении массивных в тепловом отношении заготовок могут возникать недопустимые термические напряжения, вызванные появлением разности температур поверхностных и глубинных слоев металла. Импульсное охлаждение при правильном выборе определяющих факторов способствует выравниванию температур по сечению охлаждаемой массивной в тепловом отношении заготовки.

Траектории изменения температур поверхности и центра заготовки при импульсном охлаждении могут быть различны. Начальный перепад температур  $\Delta T_{нач}$ , определяемый условиями нагрева, за время периода интенсивного охлаждения  $t_{охл}$  уменьшается при снижающихся температурах центра  $T_c$  и поверхности  $T_{пов}$ . Скорость снижения этих температур определяется параметрами внешнего и внутреннего теплообмена. По истечении периода интенсивного охлаждения по толщине заготовки формируется температурный период  $\Delta T_{охл}$ , его величина является начальным условием для формирования параметров периода медленного охлаждения.

Особо важное значение период охлаждения имеет в процессах термической обработки изделий, например ленты в рулонах, поскольку охлаждение является длительной операцией, сопоставимой по времени с длительностью периодов нагрева и выдержки. В качестве массивных тел могут выступать и элементы теплового ограждения печей различного назначения, выполненные из огнеупорных и теплоизоляционных материалов [8]. Учитывая указанные преимущества импульсного



А. Ю. Терехова

E-mail: terekhova.nastya@mail.ru

режима, представляется актуальным с научной и практической точек зрения разработка и применение такого режима к интенсификации процесса охлаждения термически массивного тела.

Исследована возможность применения импульсно-скоростного струйного охлаждения применительно к рулонам ленты в одноступенной колпаковой печи для снижения длительности полного периода охлаждения и более равномерного распределения температуры по сечению металла.

Разработана математическая модель импульсно-скоростного охлаждения, составлены алгоритм и программы расчета температуры металла при различных режимах и схемах охлаждения. Исследовано влияние различных факторов на динамику охлаждения металла, в частности:

- соотношения продолжительности периодов интенсивного охлаждения и выдержки;
- соотношения величин коэффициента теплоотдачи в период интенсивного охлаждения и выдержки;
- особенностей задания граничных условий (симметричных, асимметричных).

В основу математической модели импульсного охлаждения полого бесконечного однородного цилиндра положено дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности без источников тепла, записанное в цилиндрических координатах ( $\lambda \neq \lambda(T)$ ):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где  $T$  — температура цилиндра на расстоянии  $r$  от его оси в момент времени  $t$ , °C;  $t$  — время, с;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности охлаждаемого металла, м<sup>2</sup>/с;  $z$  — длина цилиндра, м;  $\varphi$  — угол направления радиуса в сечении цилиндра, град.

Поскольку для бесконечного цилиндра теплообменом на торцевых поверхностях по сравнению с боковой можно пренебречь, то  $\partial^2 T / \partial z^2 = 0$ .

Анализируется случай осесимметричной задачи (температура металла не является функцией угла  $\varphi$ ):

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0.$$

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right). \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что температура цилиндра является функцией только двух величин, а именно времени  $t$  и радиуса  $r$ .

Дифференциальное уравнение решалось при следующих условиях однозначности:

1. Начальные условия при  $t = 0$ ,  $T(r, 0) = T_{\text{нач}}$ : при расчете было принято, что начальная температура охлаждаемого металла  $T_{\text{нач}} = 680$  °C и постоянна по всему сечению цилиндра.

2. Геометрические условия: внешний диаметр цилиндра  $D = 0,5$  м, внутренний диаметр цилиндра  $d = 0,1$  м.

3. Физические условия: при расчете принималось, что теплофизические характеристики цилиндра (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность) постоянны по всему объему и не зависят от температуры.

4. Граничные условия третьего рода. Температура охлаждающей среды имела постоянное значение  $T_0 = 20$  °C, а коэффициент теплоотдачи в период охлаждения изменялся в пределах  $\alpha_{\text{охл}} = 100\text{--}500$ , Вт/(м<sup>2</sup>·K).

Отличительной особенностью исследуемого импульсного охлаждения является то, что цикл охлаждения разбивается на два периода: период интенсивного охлаждения длительностью  $t_{\text{охл}}$  и период выдержки длительностью  $t_{\text{выд}}$ , таким образом, суммарная продолжительность одного цикла  $t_{\text{ц}}$  равна  $t_{\text{ц}} = t_{\text{охл}} + t_{\text{выд}}$ .

Расчеты проводились при различных соотношениях длительностей периодов  $t_{\text{охл}}$  и  $t_{\text{выд}}$ , при этом  $t_{\text{охл}} = 5\text{--}20$  мин и  $t_{\text{выд}} = 5\text{--}20$  мин. Значения коэффициента теплоотдачи в период охлаждения изменились и приняли значение  $\alpha_{\text{охл}} = 100\text{--}500$  Вт/(м<sup>2</sup>·K). Расчет охлаждения металла заканчивался по истечении заданного времени всего процесса охлаждения.

Рассмотрены две схемы охлаждения: симметричная (рис. 1, а) и асимметричная (рис. 1, б).

Граничные условия третьего рода записываются в виде:

$$\alpha(T_0 - T_w) = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $T_w$  — температура поверхности металла, °C;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности металла в радиальном направлении, Вт/(м·K).

В работе принималось, что эффективный (расчетный) коэффициент теплопроводности в радиальном направлении  $\lambda_{\text{эф}} = 5$  Вт/(м·K), что характерно для ленты, свернутой в рулон.

При импульсном охлаждении граничные условия третьего рода являются кусочно-непрерывными функциями времени, и строгое аналитическое решение для данной постановки задачи отсутствует.

Суммарная плотность теплового потока от внешней поверхности муфеля в окружающее пространство, Вт/м<sup>2</sup>,  $q_{\Sigma} = q_{\text{кон}} + q_{\text{луч}}$ , где  $q_{\text{кон}}$  — плотность теплового конвективного потока на внешней поверхности муфеля, Вт/м<sup>2</sup>,  $q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{охл}}(T_{\text{муф}} - T_0)$ ;  $q_{\text{луч}}$  — плотность теплового лучистого потока от муфеля, Вт/м<sup>2</sup>.

Суммарная плотность теплового потока от внешней поверхности рулона, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q'_{\Sigma} = q'_{\text{кон}} + q'_{\text{луч}},$$

где  $q'_{\text{кон}}$  — плотность теплового конвективного потока на внешней поверхности рулона, Вт/м<sup>2</sup>,

$q'_{\text{кон}} = \alpha_{\text{зг}}(T_{\text{рул}} - T_{\text{зг}})$ ;  $q'_{\text{луч}}$  — плотность теплового лучистого потока от рулона, Вт/м<sup>2</sup>.

$$q_{\text{луч}} = c_{\text{пр}}^{\text{муф-ос}} \left[ \left( \frac{T_{\text{муф}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ос}}}{100} \right)^4 \right],$$

$$q'_{\text{луч}} = c_{\text{пр}}^{\text{муф-рул}} \left[ \left( \frac{T_{\text{рул}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{муф}}}{100} \right)^4 \right].$$

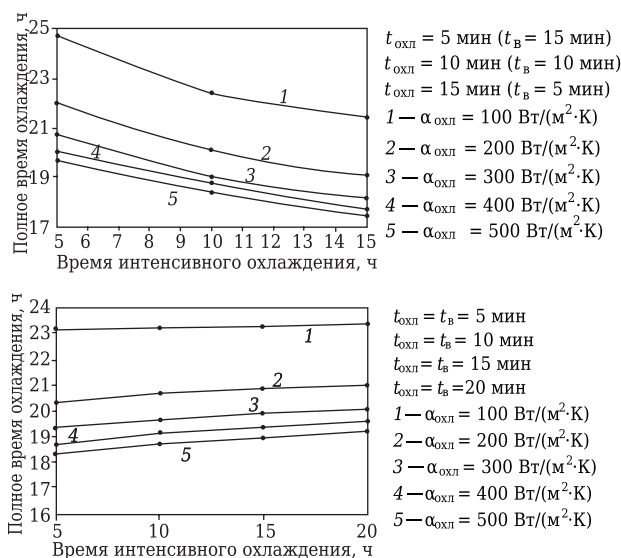
Перенос теплоты внутри цилиндра осуществляется теплопроводностью:

$$q_r = -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial r},$$

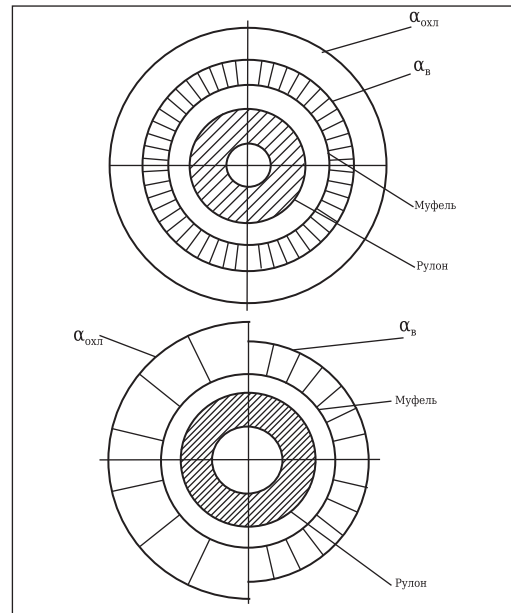
где  $\lambda_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $r$  — текущий радиус.

Асимметричная схема охлаждения заключается в том, что на одной половине боковой поверхности муфеля в течение определенного времени реализуется охлаждение с высокой интенсивностью, в то же время на другой половине боковой поверхности реализуется процесс малоинтенсивного охлаждения (выдержки). Через определенный промежуток времени схема охлаждения меняется на противоположную. Таким образом, процессы интенсивного охлаждения и выдержки с разных сторон муфеля чередуются во времени. При симметричной схеме происходит чередование периодов интенсивного охлаждения и выдержки одновременно по всей боковой поверхности муфеля.

Влияние продолжительности периода интенсивного охлаждения  $t_{\text{охл}}$  на полное время охлаждения металла показано на рис. 2. С увеличением  $t_{\text{охл}}$  полное время охлаждения сокращается (см. рис. 2, а). За счет того, что в период интенсивного охлаждения скорость охлаждения муфеля велика, возникают значительные перепады температуры между поверхностью рулона и муфелем, что способствует ускорению процесса охлаждения. При



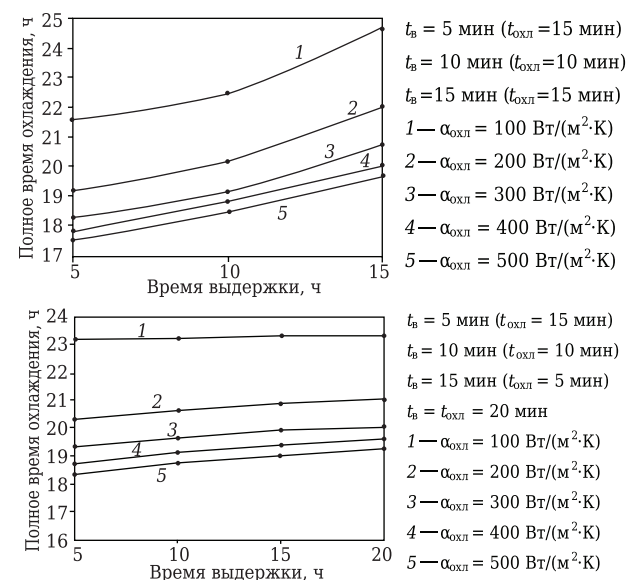
**Рис. 2.** Влияние длительности периода интенсивного охлаждения на полное время охлаждения рулонов при симметричной (а) и при асимметричной схеме (б)



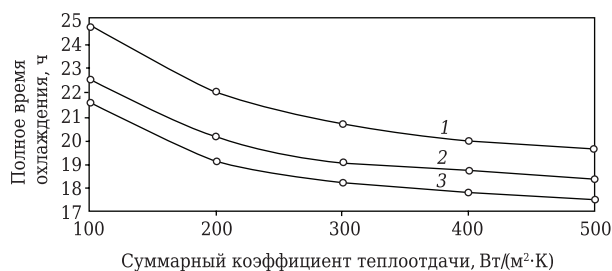
**Рис. 1.** Схема охлаждения: симметричная (а) и асимметричная (б)

асимметричной схеме охлаждения зависимость обратная — с уменьшением  $t_{\text{охл}}$  время охлаждения сокращается и максимальный эффект (наиболее быстрое охлаждение) достигается при длительности периода интенсивного охлаждения 5 мин. При такой длительности периода охлаждения общее время охлаждения составляет 18 ч (при этом внутренняя поверхность рулона охладится до 170 °С — температуры, соответствующей наименьшей степени окисления металла).

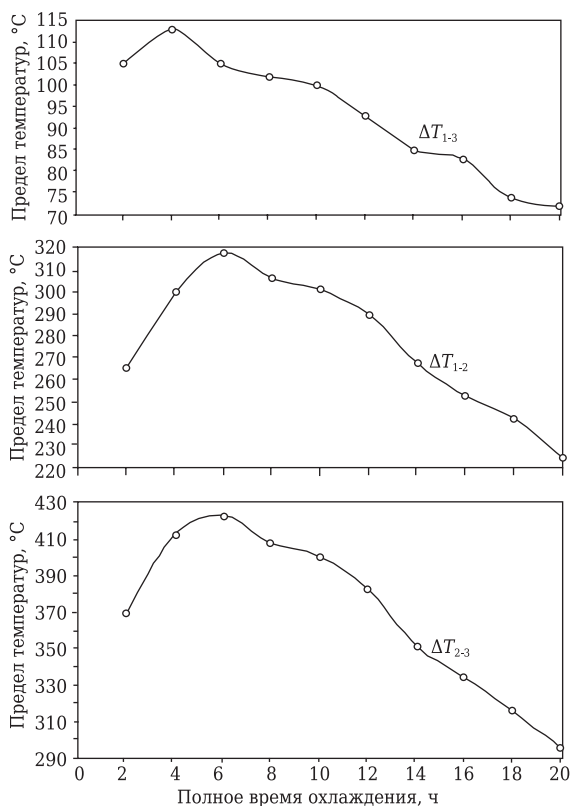
Влияние длительности периода выдержки  $t_{\text{в}}$  на суммарное время охлаждения металла показано на рис. 3. С увеличением продолжительности выдержки для всех режимов охлаждения общее вре-



**Рис. 3.** Влияние длительности периода выдержки на полное время охлаждения при симметричной (а) и асимметричной схеме (б)



**Рис. 4.** Зависимость полного времени охлаждения от суммарного коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности муфеля при симметричной схеме охлаждения: 1 —  $t_{\text{охл}} = 5$  мин,  $t_{\text{в}} = 15$  мин; 2 —  $t_{\text{охл}} = 10$  мин,  $t_{\text{в}} = 10$  мин; 3 —  $t_{\text{охл}} = 15$  мин,  $t_{\text{в}} = 5$  мин



**Рис. 5.** Динамика изменения перепада температур в процессе охлаждения между точками: а — 1–3; б — 1–2; в — 2–3. Асимметричная схема

меня возрастает. При симметричной схеме суммарное время охлаждения увеличивается также и при равенстве периодов охлаждения и выдержки.

Для снижения полного времени охлаждения необходимо использовать либо асимметричную схему охлаждения при минимальном времени

периода охлаждения, равном 5 мин (при таком режиме охлаждения за 5 мин появляются большие перепады температур между поверхностными слоями металла и муфелем, а при времени выдержки 5 мин — достаточное время, за которое температурное поле успевает выравняться), либо симметричную схему с временем охлаждения 30 мин и временем выдержки 5 мин.

Влияние коэффициента конвективной теплоотдачи на суммарную длительность процесса охлаждения рассматривалось в интервале 100–500 Вт/(м²·К) (рис. 4). С увеличением коэффициента теплоотдачи в период интенсивного охлаждения  $\alpha_{\text{охл}}$  общее время охлаждения снижается, при этом увеличение  $\alpha_{\text{охл}}$  со 100 до 300 Вт/(м²·К) приводит к существенной разнице в длительности общего времени охлаждения. При дальнейшем увеличении  $\alpha_{\text{охл}}$  сокращение полного времени охлаждения менее заметно.

Импульсный режим охлаждения существенно влияет на распределение температуры металла в радиальном направлении в ходе охлаждения. На рис. 5 показана динамика изменения величины перепадов температуры металла между характерными точками: 1 — внутренняя поверхность полого цилиндра, 2 — полутолщина стенки цилиндра, 3 — внешняя поверхность цилиндра (со стороны муфеля) при асимметричной схеме охлаждения.

Наибольшие перепады наблюдаются между температурами внешних поверхностей и серединой слоя, а наименьшие — между температурами внутренней и внешней поверхностями. В процессе охлаждения неравномерность температурного поля в радиальном направлении снижается. Степень неравномерности и положение максимума зависимостей определяется характеристиками режима охлаждения. Изменением этих характеристик можно регулировать процесс охлаждения тел любой тепловой массивности. Следует заметить, что перепады температур срединной и внешней поверхностей  $\Delta T_{2-3}$  по сравнению с  $\Delta T_{1-3}$  выше, что объясняется более высокой интенсивностью охлаждения внешней поверхности металла из-за дополнительного отвода теплоты излучением. Импульсное охлаждение массивных в тепловом отношении тел позволяет более гибко управлять процессом их охлаждения, минимизировать образование перепадов температуры по сечению, вызывающих недопустимые температурные напряжения.

#### Библиографический список

1. Прибытков, И. А. Температурное поле сляба при его нагреве с промежуточными выдержками / И. А. Прибытков, К. Т. Кадиев, В. А. Кривандин, Н. П. Кузнецова // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1986. — № 7. — С. 123–126.
2. Прибытков, И. А. Исследование глубины проникновения температурных колебаний при импульсно-

скоростном нагреве массивных слябов / И. А. Прибытков, К. Т. Кадиев, Г. В. Титова // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1988. — № 1. — 132–136.

3. Прибытков, И. А. Тепловое состояние металла при импульсно-скоростном нагреве / И. А. Прибытков // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1995. — № 1. — С. 66–69.

4. **Прибытков, И. А.** О выборе упрощенного воздействия при импульсно-скоростном нагреве металла / И. А. Прибытков, Г. В. Титова, Л. О. Мокрецова // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1997. — № 3. — С. 83, 84.
  5. **Прибытков, И. А.** Импульсно-скоростной нагрев как основа энергосберегающих технологий нагрева металла в прокатном производстве / И. А. Прибытков, В. А. Кривандин // Международная конференция «Автоматизированный печной агрегат — основа энергосберегающих технологий XXI века»; тезисы 15–17 ноября 2000 г.
  6. **Прибытков, И. А.** Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй / И. А. Прибытков // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». — М.: МИСиС, 2002. — С. 375–390.
  7. **Прибытков, И. А.** Об особенностях импульсно-скоростного нагрева сверхмассивных в тепловом отношении тел / И. А. Прибытков // Труды XVI международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии». — Украина, г. Днепропетровск, 2001.
  8. **Прибытков, И. А.** Методика расчета потерь теплоты через многослойную твердо-газовую футеровку нагревательных печей / И. А. Прибытков, А. Ю. Терехова // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 27–31.
- Pribytkov, I. A.** A technique of calculating heat losses through the multi-layer solid gas lining of heating furnaces / I. A. Pribytkov, A. Y. Terekhova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 470–475. ■

Получено 17.04.18

© И. А. Прибытков, А. Ю. Терехова,  
С. И. Кондрашенко, 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 пресующих 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