

УДК 669.54.85+621.745.58

## РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ СТРУЖКИ

**Л. Е. РОВИН, О. М. ВАЛИЦКАЯ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Возрастающее накопление металлоотходов, в том числе металлической стружки, удорожание энергоресурсов и шихтовых материалов, ужесточение природоохранных требований приводят к необходимости поиска экономичных и эффективных способов рециклинга. Об актуальности и одновременно сложности проблемы может свидетельствовать тот факт, что только в отраслевом белорусском журнале «Литье и металлургия» за последние 10 лет этой теме посвящено более сорока публикаций.

Наиболее распространенным способом переработки металлической стружки в настоящее время является брикетирование с последующей переплавкой. Брикетирование в холодном состоянии не позволяет получить качественный шихтовой материал. Брикеты горячего прессования удовлетворяют в основном требованиям плавки, но их стоимость сравнима с первичными металлами, а качество им уступает, что делает использование горячих брикетов нерентабельным. Цены на холодные брикеты из стальной и чугунной стружки в 2–2,5 раза выше, чем стружки россыпью, а горячие брикеты в 2–3 раза дороже холодных [1].

Основную долю в себестоимости горячих и холодных брикетов составляют энергозатраты. Линии брикетирования занимают большие производственные площади, имеют низкий КПД. При этом предъявляются высокие требования к подготовке стружки перед прессованием, в том числе ее сушке.

Цель работы – для уменьшения стоимости брикетов, повышения их качества и сокращения производственного цикла, уменьшения производственных площадей предлагается использовать специально разработанное оборудование: для сушки дисперсных материалов – ротационные сушилки; для высокотемпературного нагрева – ротационные наклоняемые печи (РНП) (разработанные специалистами ГГТУ им. П. О. Сухого и УП «Технолит», г. Минск). В перспективе возможна организация рентабельной децентрализованной переработки стружки на предприятиях-источниках и отказ от дорогостоящей логистической системы сбора стружки в масштабах страны.

### **Холодное брикетирование**

В настоящее время наиболее широко применяется холодное брикетирование, включающее ряд стадий: дробление (для свивной стружки); очистку от влаги, масел и СОЖ (промывка, центрифугирование и сушка); дозирование; введение добавок (связующих и восстановителей); прессование [2], [3].

Сушка металлической стружки на предприятиях проводится при температурах 250–350 °С. Сушка – энергоемкий процесс, особенно применительно к дисперсным материалам из-за низкой теплопроводности слоя. Нагрев слоя в печах камерного, проходного

типа происходит при граничных условиях первого рода. При высоких градиентах температур по толщине слоя, коэффициенте теплопроводности до  $0,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  и объемном коэффициенте передачи тепла  $35\text{--}40 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$  нагрев происходит медленно. Коэффициент полезного действия находится в пределах  $5\text{--}7\%$ . На нагрев стружки до  $250^\circ\text{C}$  затраты составляют более  $1000 \text{ МДж/т}$  или более  $15 \text{ м}^3/\text{т}$  природного газа. Определенные трудности представляют такие печи и при загрузке-выгрузке.

Более высокий КПД при нагреве дисперсных материалов обеспечивают печи, работающие с динамическим слоем: барабанные, ротационные, печи с псевдоожженным слоем и др. Важнейшее преимущество этих печей – интенсификация теплообмена за счет резкого повышения эффективности передачи тепла конвекцией в динамическом слое ( $1,2\text{--}2,5 \text{ кВт/м}^3 \cdot \text{К}$ ). Термический КПД печей достигает  $20\text{--}25\%$ . Однако такая эффективность достигается при достаточной длительности пребывания газов-теплоносителей в печи, т. е. при большой длине печи ( $15\text{--}20 \text{ м}$ ), при соотношениях длины и диаметра  $10\text{--}15$  крат и более. Соответственно, загрузка печей составляет десятки тонн, а работа их должна быть непрерывной. Таким образом, масштабы печей не позволяют осуществлять децентрализованную рентабельную переработку стружки. Для малых объемов материалов и периодического режима работы применяются так называемые короткобарабанные печи (КБП). Они достаточно технологичны, но КПД их ниже  $10\%$ . Высокие скорости поступательного движения газов, что необходимо для обеспечения высокой турбулентности и, соответственно, теплопередачи конвекцией, приводят к тому, что время пребывания газов-теплоносителей в рабочем пространстве печей составляет, как правило, доли секунды (до  $0,5 \text{ с}$ ).

Вследствие этого было принято решение исследовать работу КБП и, прежде всего, сушил с целью изыскания возможности повысить эффективность их тепловой работы и снизить удельные затраты топлива. Работа была включена в программу ГНТП «Сушка» (Головная организация ИТМО им. Лыкова НАН Республики Беларусь).

Широкие возможности исследования аэродинамических и тепловых процессов, протекающих в условиях высоких градиентов температур и скоростей, предоставляет использование ППП SolidWorksFlowSimulation и ANSYSCFX. Компьютерное моделирование с помощью этих универсальных модулей позволяет получить представление о траектории и распределении неизотермического потока в печи с учетом ее вращения, геометрии и расположения слоя материала. Движение потока описывается с помощью систем уравнений Навье–Стокса для реальных неизотермических потоков, неразрывности и энергии, а изменения температуры – по уравнению Фурье–Кирхгофа.

Тепловой баланс проверялся путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III рода для динамического слоя материала при замене коэффициента теплопроводности на приведенный коэффициент теплообмена для продуваемого слоя.

В результате исследований были получены рекомендации для разработки новых конструкций печей (ротационные сушила), которые позволяют практически вдвое повысить КПД при нагреве дисперсных материалов [6], [8]. Полученные решения проверялись в реальных условиях на КБП емкостью  $1$  и  $3 \text{ т}$ . Во время работы фиксировались температуры и расход газов на выходе из печи, аэродинамическое сопротивление печи, удельный расход топлива и определялся КПД печей [10].

Применение новых печей (сушил) позволяет снизить эксплуатационные расходы, сократить занимаемые площади и главное – повысить производственную гибкость рециклинга металлоотходов. Переработку можно производить без накопления значительных объемов стружки по мере ее образования. Пример подобного решения представлен на рис. 1.

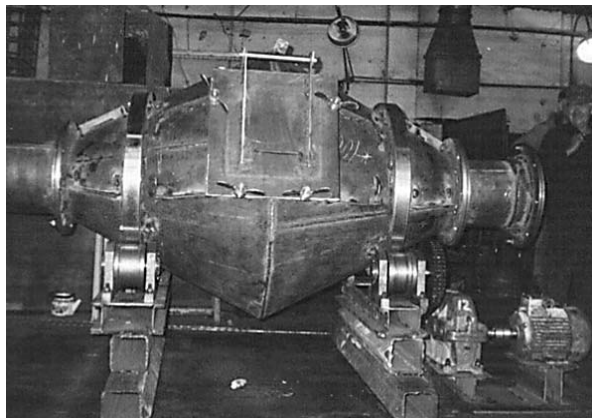


Рис. 1. Двухкорпусное ротационное сушило (патент Республики Беларусь № 1424)

При холодном брикетировании получают относительно дешевые брикеты, но невысокого качества (даже с применением эффективных агрегатов сушики). Например, плотность брикетов из чугунной стружки, как правило, – 3000–3500 кг/м<sup>3</sup>, максимум – 4400–4600 кг/м<sup>3</sup>; химический состав нестабильный, механическая прочность низкая. Без сушики в брикетах также остается вода и масло – 1,5 % и выше. Всякого рода связки, добавки восстановителей принципиально не улучшают качество брикета.

Избавиться от остатков масел, воды и добиться повышения плотности прессовки более 6000 кг/м<sup>3</sup> возможно лишь при горячем брикетировании.

#### **Горячее брикетирование**

В настоящее время горячее брикетирование, как правило, осуществляется в две стадии: предварительное прессование дробленой очищенной (в том числе с проведением сушики при 250–350 °С) или неочищенной стружки, затем нагрев брикетов до температуры 650–750 °С и повторное прессование [4], [5].

Горячее брикетирование позволяет улучшить качество брикетов, но делает их значительно дороже, что сводит к минимуму экономический эффект. Основной вклад в стоимость горячих брикетов вносит двукратный нагрев материала.

Решить проблему ресурсосбережения можно при создании малотоннажного комплекса брикетирования, включающего нагрев стружки и одностадийное прессование. Нагрев при этом должен осуществляться до температур пластической деформации, но не выше температуры спекания, а прессование – производиться непосредственно после нагрева. Плотность полученного брикета и его качество как шихтового материала будут приближаться к плотному металлу.

Подобные идеи – осуществление горячего брикетирования в одну стадию выдвигались неоднократно. Однако процесс во всех случаях трудно поддавался реализации, как нам представляется, в основном из-за отсутствия эффективного оборудования для безокислительного высокотемпературного нагрева полидисперсного материала.

Агрегатом, отвечающим данным условиям, является новый тип печей – ротационные печи с наклоняющейся осью вращения, обеспечивающие петлеобразное движение газов [7], [9]. Высокая эффективность РНП, производственная гибкость и компактность, возможность производить нагрев стружки без потерь на угар до температур 850 °С позволяют осуществить переход к одностадийному прессованию при брикетировании. В этом случае весь процесс сводится к сбору, дроблению, высокотемпературному нагреву (в РНП) и прессованию горячей стружки.

Преимущества РНП здесь очевидны. Они позволяют быстро и качественно нагревать любую неподготовленную (за исключением дробления свивной стружки), загрязненную, замасленную (без ограничений) стружку при минимальных затратах

топлива до максимальных температур. Немаловажным преимуществом является возможность без всяких перестроек обрабатывать в печи различную по составу стружку, например, стальную, чугунную, легированную и т. п.

Теория РНП в настоящее время разработана недостаточно. В новейшем двухтомном справочнике по вращающимся печам [11] данные печи не упоминаются. В связи с этим применение РНП для специфической задачи – высокотемпературного нагрева стружки потребовало предварительного исследования режимов взаимного движения газов и дисперсного материала.

Данная работа была проведена с помощью компьютерного моделирования – для газов и физического имитационного – для стружки.

Картина течения газов одного из исследованных режимов представлена на рис. 2.

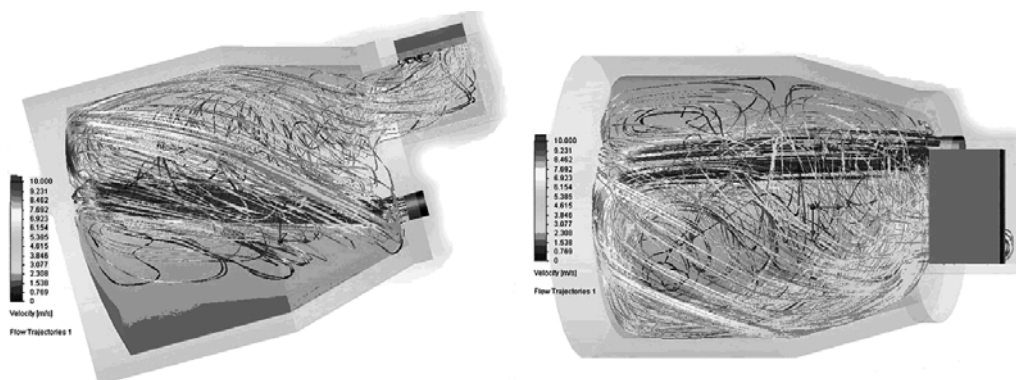


Рис. 2. Траектории движения тепловых потоков в ротационных наклоняющихся печах

Полученные решения позволяют определить не только качественную картину течения, но и количественные значения параметров теплопереноса. Передача тепла от теплоносителя нагреваемому слою стружки происходит на поверхности раздела фаз, а далее тепло передается теплопроводностью и конвекцией при перемешивании слоя. В общем виде процесс можно описать уравнением Фурье–Киркгофа. Отсюда следует необходимость исследований режима движения газов дисперсного материала, что определяется силами межчастичных связей, внутреннего трения в слое, трением на границе «материал–футеровка», силами инерции (центробежными силами) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы вращающегося скоростного потока газов. Чем больше сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушается) слой.

В сечении слоя, перпендикулярном оси вращения печи, образуется так называемый «чечевицеобразный» профиль. Эта форма наблюдается как в промышленных печах (рис. 3), так и на имитационных моделях (рис. 4).

Исследования, выполненные на имитационных моделях, выявили, что скорость вращения слоя значительно выше скорости печи и относится к последней, как диаметр печи к приведенному диаметру слоя материала в данном сечении. Приведенный диаметр равен:  $d_{пр} = l_{пр} / \pi$ . Здесь  $l_{пр}$  – длина поверхности слоя. Соотношение увеличивается от днища печи к входному диффузору.

Циркуляция материала в РНП происходит как в сечении, перпендикулярном оси вращения печи, так и в продольном направлении.



Рис. 3. Нагрев до температуры 820 °С и разгрузка стружки в РНП

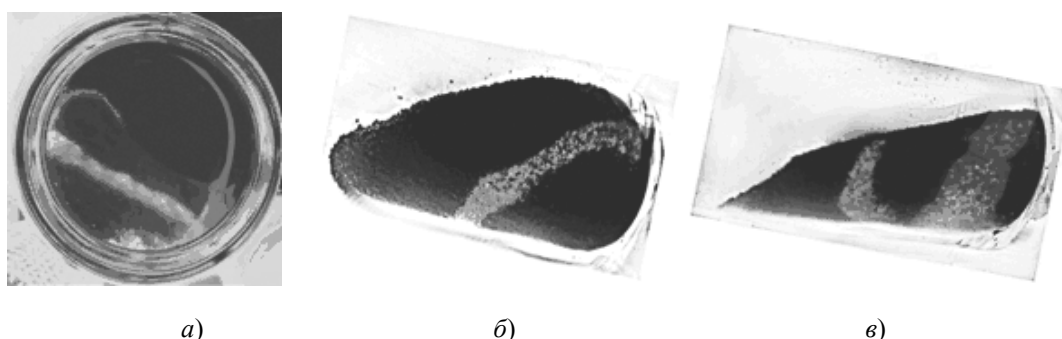


Рис. 4. Перемещение нагретого слоя в РНП (имитационная модель):  
 а – поперечное сечение; б – продольное (1 оборот); в – продольное (3 оборота)

Частицы материала совершают сложное винтовое возвратно-поступательное движение. В результате исследований движения и теплообмена в РНП были получены рекомендации по выбору конструктивных и режимных параметров при проектировании печей для высокотемпературного нагрева стружки, реализация которых на практике оказалась достаточно успешной [10].

Термический КПД при нагреве дисперсных материалов (стружки, окалины, шлама и т. д.) достигает 50–60 %, что в 2–3 раза превышает КПД традиционных печей; почти 2-кратно увеличивается производительность и сокращается время нагрева и в 2–3 раза меньше затрачивается времени на операции завалки-разгрузки. Нагрев стружки в печи емкостью 2–4 т осуществляется в течение 12–20 мин при расходе 8–12 м<sup>3</sup> природного газа на 1 т. Причем меньшие цифры относятся к наиболее загрязненной стружке.

Разработка и внедрение РНП для нагрева стружки на Гомельском ОАО «Центролит» была отмечена Премией Министерства промышленности Республики Беларусь в номинации «Энергосберегающие технологии и оборудование».

Нагрев стружки сопровождается значительными изменениями состояния ее поверхности, адгезионных и когезионных свойств, внутреннего трения в слое и внешнего трения по поверхности печи. Как правило, меняется и гранулометрия материала (например, дисперсность чугушной стружки увеличивается вдвое) [12]. Из-за снижения адгезионных свойств горячая стружка при выгрузке течет подобно жидкости (см. рис. 3). Значительно (в 1,5–2,3 раза в зависимости от материала) повышается насыпная плотность, что имеет большое значение при последующем прессовании.

### Прессование горячей стружки

Несмотря на ряд работ, выполненных в последнее время, технология горячего брикетирования стружечных материалов не разработана. Так, в частности, в ряде работ указывается в качестве оптимального нагрева стружки температура 650–700 °С [5]. Причем обосновывается эта величина началом интенсивного окисления металла.

Наши исследования нагрева стружки в динамических слоях показали, что скорость окисления – наибольшая в интервале 400–600 °С и замедляется при дальнейшем повышении температуры, что можно объяснить тормозящим влиянием слоя оксидов. При интенсивном нагреве в РНП до 850 °С окисление металла составляет не более 0,3–0,5 %, что меньше, чем в традиционных печах при нагреве до 450 °С, и не может служить ограничивающим фактором.

Более рациональным является уровень нагрева в области температур ~ 850 °С, который ограничен температурами начала «сваривания» частиц: для чугуна ~ 900 °С, для стали ~ 1000 °С.

Прессование стружки изучено существенно меньше, чем процессы уплотнения порошков. Поэтому в настоящее время для его описания используются в основном силовые и энергетические уравнения, полученные для порошковых материалов. Затраты энергии при брикетировании стружки слагаются из расходов на нагрев и механическую работу собственно прессования. Если расход теплоносителей контролируется в процессе обработки, то затраты на работу прессования требуют аналитических расчетов.

Для сравнительного анализа, в данном случае – определения энергозатрат при прессовании горячей и холодной стружки черных металлов, воспользуемся уравнениями, описывающими работу прессования ( $A_0$ ) и давления, предложенными Г. М. Ждановичем [13], с учетом различий в исходных характеристиках материалов:

$$A_0 = \frac{p_k S_n h_0}{\beta_0^n - 1} \left\{ \frac{1}{n-1} \left[ \left( \frac{h_0}{h} \right)^{n-1} - 1 \right] - \left( 1 - \frac{h}{h_0} \right) + \frac{A\beta_0}{2(n-2)} \left[ \left( \frac{h_0}{h} \right)^{n-2} - 1 \right] - \frac{1}{4} A\beta_0 \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 \right] \right\},$$

где  $p_k$  – давление прессования идеального процесса;  $S_n$  – номинальное сечение прессовки;  $h_0, h$  – высота насыпки порошка, высота прессовки в рассматриваемый момент прессования;  $\beta_0$  – относительный объем насыпки;  $n$  – показатель степени;  $A$  – работа сил внешнего трения.

С учетом снижения сил внешнего трения (при термообработке в РНП адгезия стружки снижается в 2–3 раза) можно принять, что величина работы прессования будет примерно равна работе идеального процесса при  $\nu = 1$ , т. е. 100 % плотности брикета:

$$A_{pk} \frac{p_k S_n h_k \beta_0}{(\beta_0^n - 1)} \left[ \frac{1}{h-1} (\beta_0^{n-1} - 1) - \frac{\beta_0 - 1}{\beta_0} \right],$$

где  $p_k$  – нормальное давление контакта;  $S_n, h_k$  – площадь и высота прессовки (брикета).

Данное упрощение вполне допустимо, так как снижение твердости и прочности материала в 2,0–2,5 раза при максимальных температурах нагрева позволяют получить относительный объем и плотность прессовки, соответственно,  $\beta_0$  и  $\nu_0$  более 0,9.

Показатель  $n$  вычисляется из уравнения прессования:

$$n = \frac{2 \lg \frac{1 - \chi(\nu_{\text{cp}})}{\chi(\nu_{\text{cp}})}}{\lg \beta_0},$$

где  $\nu_{\text{cp}}$  – среднегеометрическое значение относительной плотности;  $\chi$  – коэффициент, определяемый степенью пластичности материала (для  $\nu$  от 1 и менее)

Величина  $n$  зависит от механических свойств материала, насыпной плотности, адгезионных свойств и особенностей прессования, в том числе соотношения диаметра и высоты прессовки (брикета). Для условий брикетирования  $n = 2,7-3,2$ .

Аналогичным образом можно определить реальную работу на преодоление внешнего и внутреннего контактного трения при прессовании.

Затраты энергии на уплотнение горячей стружки распределяются между работой на упругопластическую деформацию компонентов прессовки и преодоление сил межчастичного контактного трения (~ 70 %). Работа преодоления сил внешнего трения при этом составляет не более 25 % от общей работы прессования.

Сравнивая затраты энергии на холодное и горячее прессование, необходимо учесть, что в первом случае при идентичных давлениях (300–350 МПа) пластическая деформация частиц практически не развивается, что и объясняет недостаточную прочность и осыпаемость брикета.

В результате прессования стружки в горячем состоянии (750–800 °С) при сохранении величины давления в пределах 300–350 МПа относительная плотность брикета достигает величины  $\nu = 0,91-0,93$  и более, при этом абсолютная плотность возрастает до 7250 кг/м<sup>3</sup> (для стальной стружки). Соответственно, уменьшается пористость брикета, возрастает теплопроводность и прочность (62,3–78,2 МПа), что немаловажно при переплавке и транспортировке. Несколько меньше плотность брикетов из чугунной стружки (до 6500 кг/м<sup>3</sup>), однако прочность, устойчивость против ударов и другие параметры также повышаются.

Работа прессования уменьшается по сравнению с холодным процессом примерно в 2,0 раза и более и составляет 32000–57000 кДж на 1 т брикетов размером 120–150 мм в диаметре и высотой 50–60 мм. С учетом КПД это эквивалентно 22–38 кВт · ч против 45–80 кВт · ч – при холодном прессовании. На нагрев 1 т стружки при этом (без учета масла) расходуется ~ 10 м<sup>3</sup> газа (в эквиваленте 100 кВт · ч) или при работе на неочищенной стружке – 8 м<sup>3</sup>/т против 19–25 м<sup>3</sup>/т – при традиционном оборудовании.

Таким образом, ликвидация технологических операций (центрифугирование, сушка (нагрев до 250°); первая стадия прессования до  $\nu = 0,3-0,6$ ) и применение печей РНП (нагрев стружки до  $t = 750-850$  °С) при одностадийном прессовании позволяют получить более качественный плотный брикет не только не увеличивая энергозатраты, но даже снижая их в среднем на 95–180 кВт · ч на 1 т стружки черных металлов.

При сохранении холодного прессования, но с использованием ротационных сушил и ликвидацией центрифугирования (в качестве первого малозатратного этапа модернизации) сокращение энергозатрат составит, соответственно, 50–60 кВт · ч на тонну брикета.

Немаловажными преимуществами нового оборудования являются производственная гибкость и малая потребность в площадях.

### Заключение

Разработанное новое оборудование для низко- и высокотемпературного нагрева дисперсных материалов наилучшим образом отвечает задаче переработки дисперсных металлоотходов, загрязненных маслами, технологическими жидкостями и случайными неметаллическими включениями.

Ротационные сушила и ротационные наклоняющиеся печи позволяют существенно сократить энергозатраты при холодном и горячем брикетировании, снизить усилие прессования.

Интенсификация процессов теплообмена в рабочей камере печи позволяет уменьшить габариты печи и время термической обработки по сравнению с применяемыми для сушки и нагрева печами.

Брикетирование возможно осуществлять без ряда подготовительных операций (центрифугирование, предварительное прессование и др.), что, соответственно, позволит уменьшить общие габариты линии.

На базе нового оборудования возможен переход к рентабельному децентрализованному рециклингу – переработке металлоотходов на предприятиях-источниках, что даст возможность отказаться от дорогостоящей логистической системы сбора в масштабах страны.

Значимость для народного хозяйства страны производства качественной шихты из металлоотходов подчеркивается в Указе Президента Республики от 22 июля 2010 г. № 378, где среди приоритетных направлений научно-технической деятельности на 2011–2015 гг. в области металлургии указано «горячее брикетирование стружки».

### Литература

1. Анализ потенциальных направлений промышленной переработки стружки черных металлов в Республике Беларусь / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 23–26.
2. Гарост, А. И. Использование замасленной чугунной стружки для замены дорогостоящего дефицитного лома / А. И. Гарост // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 17–26.
3. Стеблов, А. Б. Переработка стружки черных металлов / А. Б. Стеблов, М. Л. Герман // Рынок вторичных металлов. – 2007. – № 1/39. – С. 46–49.
4. Дьяконов, О. М. Обезвоживание и обезмасливание металлической стружки / О. М. Дьяконов // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (спецвыпуск). – С. 186–191.
5. Дьяконов, О. М. Получение металлургических брикетов на основе стружко-порошковых композиций горячим прессованием / О. М. Дьяконов // Литье и металлургия. – 2011. – № 4. – С. 129–137.
6. Ротационная установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов : пат. 1424 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин ; заявитель УН «Технолит». – № и 20030457 ; заявл. 31.10.2003 ; опубл. 30.06.2004 // Афіц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 2. – С. 291.
7. Ротационная качающаяся установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов : пат. 1732 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин ; заявитель УН «Технолит». – № и 20040238 ; заявл. 18.05.2004 ; опубл. 30.12.2004 // Афіц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 4. – С. 272.



8. Ротационная установка для термообработки и сушки дисперсных и кусковых материалов : пат. 2428 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № и 20050341 ; заявл. 08.06.2005 ; опубл. 03.10.2006 // Афіц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 208.
9. Ротационная установка для плавки дисперсных и кусковых материалов : пат. 2770 Респ. Беларусь, МПК F27B 7/00 / Л. Е. Ровин, О. М. Валицкая, С. Л. Ровин ; заявитель УН «Технолит». – № и 20050564 ; заявл. 26.09.2005 ; опубл. 30.06.2006 // Афіц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3. – С. 208.
10. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. – Минск : БНТУ, 2015. – 382 с.
11. Ладыгичев, М. В. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология : в 2 кн. / М. В. Ладыгичев, В. Г. Лисиенко, Л. М. Щелоков. – М. : Теплотехник, 2004. – Кн. 1. – 688 с.
12. Чугунная стружка как шихтовой материал / С. Л. Ровин [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 158–161.
13. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – М. : Металлургия, 1969. – 264 с.

*Получено 29.01.2016 г.*