

непрерывной разливке стали в Украине: Научно-практическая конференция (4-5 ноября 2010г, Донецк). – Донецк: Норд-пресс, 2010. – С.507-514.

6. Крикунов Б.П. Подбор смеси для отливки заготовки  $\square$ 120-140 мм на сортовой МНЛЗ ООО "ТСА Стил групп" / Б.П.Крикунов, А.П.Сивер, А.И.Русецкий [и др.] // Сб. научн. тр. конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали» (25-26 октября 2011г, Донецк). – Донецк: Кальмиус, 2011. – С.207-213.

Надійшла до редакції 18.10.2011

Рецензент д.т.н., проф. М.О. Маняк

© Штепан Е.В., Шабловский А.В.

УДК 669.3-412:621.74.047

**А.Н.Смирнов, В.Е. Ухин, И.В. Шутов, В.А. Головатый**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПРОФИЛЯ**

Представлены результаты физического моделирования процесса затвердевания непрерывнолитой трапециевидной заготовки. Установлены особенности формирования кристаллической структуры медного бруса, полученного на роторной МНЛЗ. Показано влияние динамики роста дендритных кристаллов меди на образование внутренних дефектов в трапециевидной заготовке.

Ключевые слова: медный брус, заготовка, непрерывное литье, роторная МНЛЗ, трапециевидное сечение.

#### **Введение**

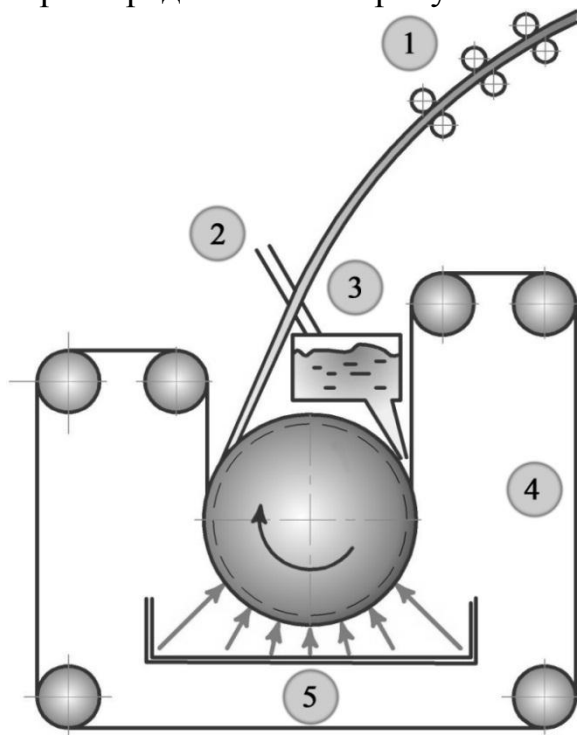
В условиях постоянного изменения ситуации на мировых рынках металлургической продукции и растущего уровня конкуренции перед предприятиями-производителями продукции из меди и ее сплавов, остро стоит задача повышения эффективности производства и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции востребованного качества. Высокие качественные показатели изделий из меди, в том числе электротехнические параметры и пластичность, обеспечиваются минимальным содержанием в ней примесей. Традиционно производство меди основано на добыче и переработке руд, прежде всего, соединений меди с кислородом и серой [1,2].

Сегодня при производстве медной продукции в Украине наиболее эффективным методом является получение меди огневого рафинирования из вторичного сырья, поскольку этот метод позволяет обеспечить достаточный уровень качества технической меди при ее производстве из местного сырья. Это позволяет эффективно применять такую медь для изготовления электротехнической, строительной и машиностроительной продукции [3,4]. При этом наиболее актуальной задачей является разработка тех-

нологий и оборудования для производства металлопродукции по принципу совмещённых технологий разливки и прокатки. Особенно эффективной такая схема представляется в случае производства катанки для электротехнической продукции, поскольку совмещение процесса разливки и прокатки позволяет существенно минимизировать потребление энергии и снизить затраты труда на производство продукции в сравнении с традиционной схемой прокатки из слитков (анодов) [5,6].

Комплексная технология получения качественной продукции из медного лома для электротехнической промышленности реализована в условиях ПАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов» (ПАО «АЗОЦМ»). Технологический процесс изготовления медной катанки совмещает в одной технологической цепочке следующие операции: плавка шихты, отливка непрерывнолитой заготовки, ее прокатка до размера катанки, осветление, охлаждение и смотка в бухты.

Полученная в условиях ПАО «АЗОЦМ» методом огневого рафинирования медь разливается на машине для непрерывной разливки меди роторного типа, схема которой представлена на рисунке 1.



1 – получаемая заготовка; 2 – желоб для подачи меди из миксера; 3 – промежуточный ковш; 4 – стальная лента; 5 – зона водяного охлаждения колеса

Рисунок 1 – Принципиальная схема разливки меди на роторной МНЛЗ

Основные характеристики роторной МНЛЗ (конструкция фирмы «Properzi») следующие:

- диаметр литейного колеса с бандажом – 2000 мм;
- производительность – 6,0 - 14,5 т/ч (662-1580 об/ч);

- конфигурация поперечного сечения заготовки – трапеция;
- высота заготовки –  $35 \pm 10$  мм;
- ширина заготовки –  $65/55 \pm 10$  мм;
- площадь сечения отливаемой заготовки –  $2100 \text{ мм}^2 \pm 10\%$ ;
- материал банджа литейного колеса – хромовая бронза с добавкой циркония;
- длина ленты кристаллизатора –  $27200 (+ 300 / - 200)$  мм;
- материал ленты – низкоуглеродистая сталь.

Для реализации продукции из меди огневого рафинирования (особенно с вовлечением в производство низкосортного сырья) по международным стандартам необходимо наряду с механическими свойствами контролировать и электротехнические свойства. Однако при производстве медного проката из трапециевидных заготовок, полученных на роторной МНЛЗ, в некоторых случаях наблюдается несоответствие параметров готовой продукции требованиям заказчиков. Снижение качества медной катанки в основном связана с внутренними дефектами литого трапециевидного бруса (пористость, инородные включения и т.д.), которые закатываются в проволоку и ухудшают ее электротехнические характеристики.

### Цель работы

С целью идентификации причин формирования внутренних дефектов (рисунок 2) медной заготовки трапециевидно профиля было выполнено исследование особенностей формирования кристаллической структуры бруска, полученного на разливочной машине роторного типа.



Рисунок 2 – Дефекты внутренней структуры в бруске трапециевидного сечения, который получен на разливочной машине

## Основная часть

Наиболее эффективным методом исследования затвердевания различного рода заготовок является физическое моделирование, так как оно позволяет контролировать теплофизические параметры системы (интенсивность теплоотвода от модели), а также визуализировать процесс формирования кристаллической структуры слитка [7-9]. При этом особое значение приобретает выбор моделирующего вещества, которое должно не только обладать оптической прозрачностью, но также иметь определённую совокупность теплофизических характеристик, позволяющих обеспечить соответствующую систему критериев подобия. Дополнительным условием, которое представляется крайне важным, является затвердевание вещества по дендритному механизму.

Как показывает анализ, в наибольшей степени вышперечисленным требованиям соответствует химическое соединение камфен (2,2-диметил-3-метилтен-бициклогептан), которое затвердевает с образованием дендритной структуры. При этом в жидком состоянии камфен сохраняет оптическую прозрачность вплоть до полного затвердевания [10-11]. Теплофизические свойства камфена, которые были определены авторами в лабораторных условиях, приведены в табл.1.

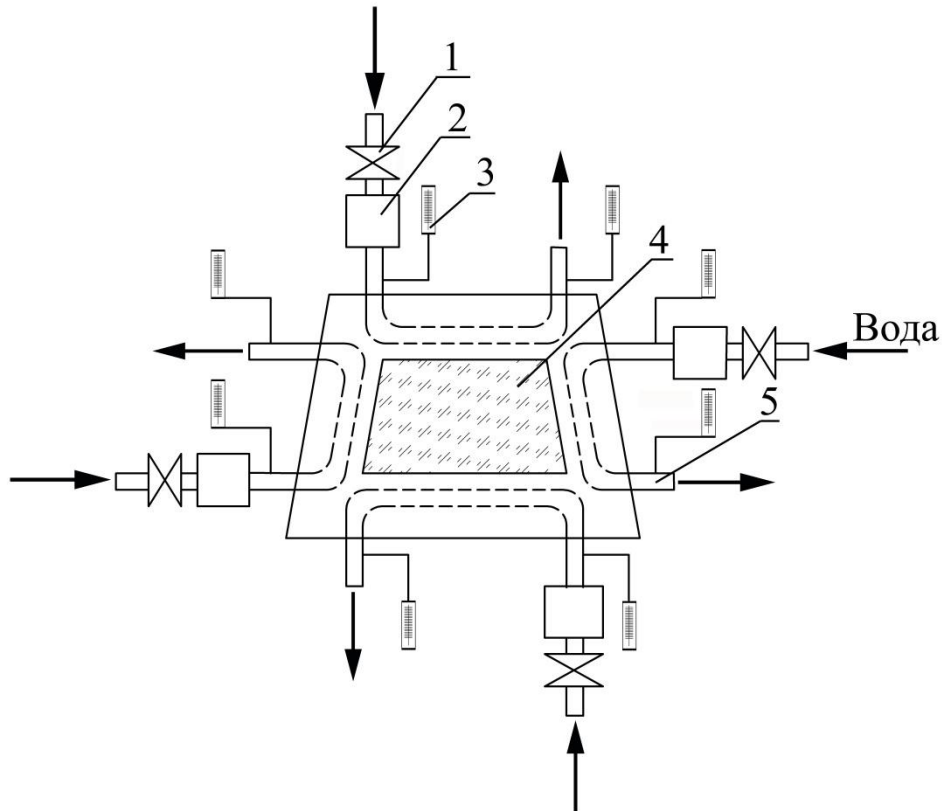
Таблица 1 – Некоторые физические и теплофизические свойства камфена

Температура солидус, °С	Температура ликвидус, °С	Теплота кристаллизации, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Температура- ропроводность, м <sup>2</sup> /с	Поверхностное натяжение, Н/м	Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с
			жидкий	твердый			
33	35	40,2	2,4	2,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,021	$7,2 \cdot 10^{-6}$

Для исследования особенностей формирования кристаллической структуры медного слитка была создана физическая модель, имитирующая поперечное сечение трапециевидного бруска. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.

Расплав камфена затвердевает в модели кристаллизатора, которая изготовлена из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла. Внутри модели кристаллизатора вмонтированы медные трубки (рисунок 3, поз.1) диаметром 5 мм, через которые с определенным расходом пропускается охлаждающая вода. К нижней части модели приклеено прозрачное стекло (рисунок 3, поз.3), которое позволяет визуализировать процессы затвердевания при пропускании света через жидкую ванну. Соответственно, при такой схеме интенсивность теплоотвода через

водоохлаждаемые стенки модели на несколько порядков выше, чем через мениск моделирующего вещества и прозрачное стекло.



1 – клапан регулирования подачи охлаждающей воды; 2 – термометр; 3 – расходомер; 4 – стекло; 5 – медная трубка.

Рисунок 3 – Общая схема лабораторной установки для моделирования особенностей формирования кристаллической структуры медного слитка.

Физическая модель выполнена в масштабе 1:1 по отношению к моделируемому объекту – медному трапециевидному бруску сечением  $50 \times 65 \times 35$  мм. Температура заливки камфена составляла  $38 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составляло  $18 \div 20^\circ\text{C}$ . С целью предотвращения влияния теплоотвода через стекло и мениск расплавленного камфена на процесс затвердевания высота модельного слоя жидкости была принята равной 20 мм.

Компенсация различий в теплофизических параметрах меди и камфена осуществлялась путем регулирования интенсивности режимов отвода тепла таким образом, чтобы выполнялось условие тождественности произведения критерия Био ( $Bi$ ) и критерия фазового перехода ( $N$ ) ( $Bi \cdot N = idem$ ). Временной масштаб моделирования  $\mu_\tau$  определяли исходя из идентичности критерия Фурье ( $Fo = idem$ ) в соответствии с формулой:

$$\mu_\tau = \frac{a_m}{a_{cu}} \cdot \mu_L^2, \quad (1)$$

где  $a_m$  и  $a_{cu}$  - коэффициенты температуропроводности моделирующего вещества и меди соответственно.

При этом наличие развитой двухфазной зоны учитывалось посредством эффективных значений коэффициентов температуропроводности, которые определялись при помощи следующего уравнения:

$$a_{эф} = \lambda / \rho(C + L / \Delta T_{кр}) \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – средняя массовая теплоёмкость вещества, кДж/(кг·К);  $L$  – теплота кристаллизации вещества, кДж/кг;  $\Delta T_{кр}$  – интервал температур затвердевания, °С.

Процесс формирования твердой корочки вещества в лабораторной модели фиксировался при помощи цифрового фотоаппарата в режиме макросъёмки, что позволило визуализировать образование кристаллов и особенности формирования дендритной структуры.

В ходе физического моделирования установлено, что механизм затвердевания модельного вещества при исследовании особенностей формирования кристаллической структуры медной трапецевидной заготовки имеет существенные отличия от «классического» механизма кристаллизации, при котором кристаллы растут параллельно друг другу (рисунок 4).

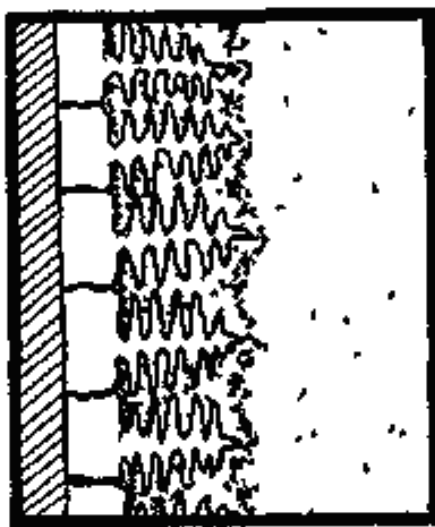


Рисунок 4 – Схема «классического» механизма роста дендритных кристаллов.

Основной особенностью формирования кристаллической структуры слитка меди является то, что направление роста дендритов в большинстве случаев является хаотичным относительно поверхности теплоотвода, а скорости роста отдельных кристаллов отличаются на 25-35%. При этом

развитие близлежащих кристаллов прекращается из-за столкновения с вторичными ветвями более интенсивно развивающихся дендритов.

Также в процессе моделирования установлено, что при кристаллизации расплава по описанному выше механизму возможно столкновение наиболее интенсивно развивающихся кристаллов, растущих на соседних гранях, при котором смыкающиеся главные оси дендритов отделяют часть жидкой фазы от общего объёма (рисунок 5).

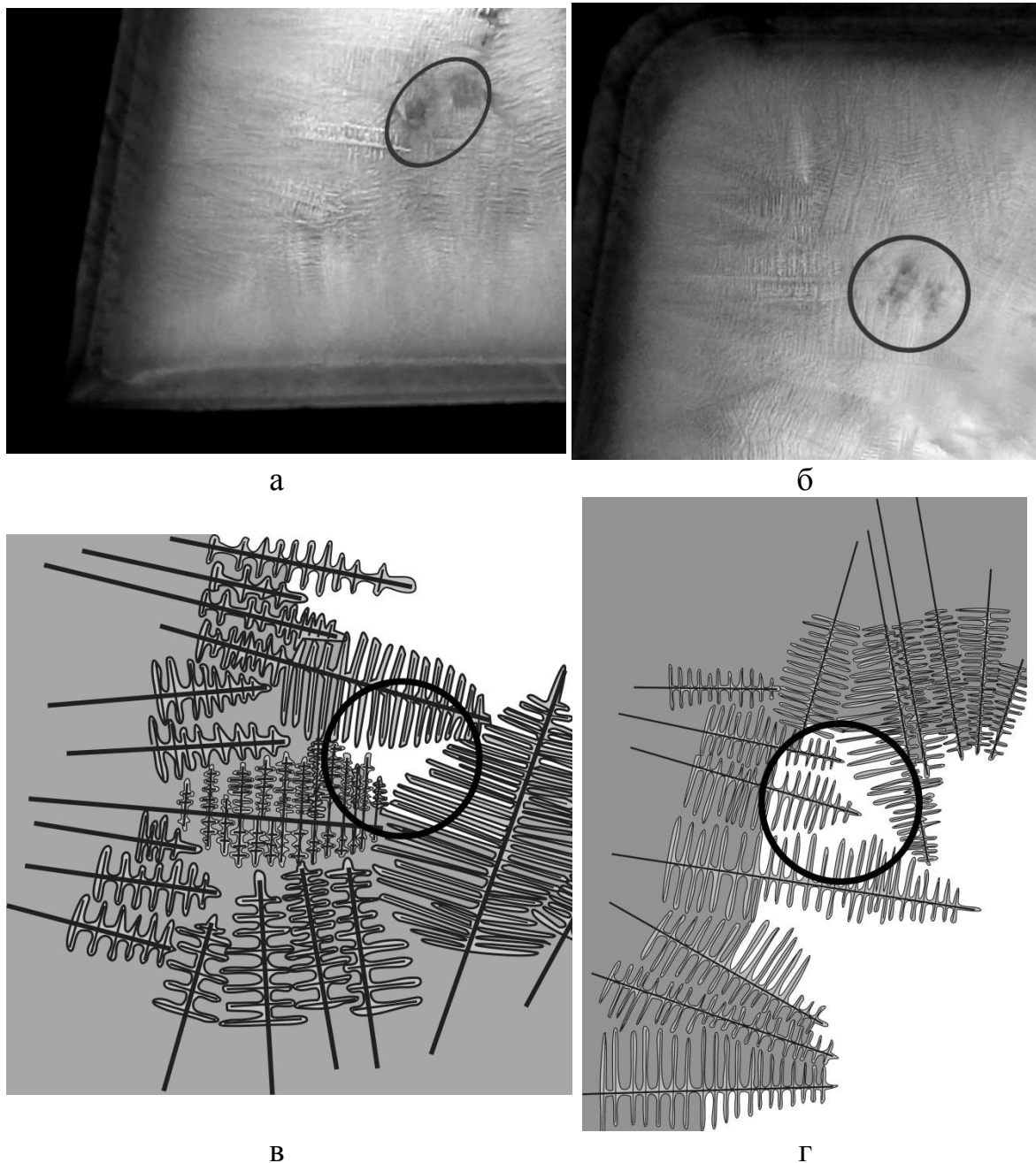


Рисунок 5 – Фотографии (а и б) и схемы (в и г) изолированных объёмов моделирующей жидкости возле острого и тупого угла модели соответственно.

Этот изолированный объем жидкой фазы не имеет возможности подпитываться расплавом из осевой части заготовки. В процессе дальнейшего затвердевания такая область усаживается и формирует усадочную раковину внутри слитка. В связи с хаотичностью направления роста дендритных кристаллов и высокой скоростью затвердевания меди формирование подобного рода дефектов возможно в любой точке поперечного сечения заготовки.

### **Выводы**

В результате выполненных исследований установлено, что формирование внутренних дефектов, а в частности пористости, в медной заготовке связано с особенностью формирования кристаллической структуры меди при её разливке на МНЛЗ роторного типа. Показано, что в процессе затвердевания трапециевидного слитка на колесе между наиболее интенсивно развивающимися кристаллами соседних граней заготовки образуются области жидкой фазы, изолированные от общего объема расплава главными осями дендритов. Усадка таких областей в процессе затвердевания является причиной формирования пор внутри слитка.

Неупорядоченное расположение внутренних пор в поперечном сечении трапециевидного медного бруска объясняется хаотичностью направлением роста дендритных кристаллов, различием скоростей их роста.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Осинцев О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки [справочник] / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336с.
2. Уткин Н.И. Производство цветных металлов / Н.И. Уткин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 442с.
3. Рафинированная медь Украины / Ю.Д. Савенков, В.И. Дубоделов, В.А. Шпаковский [и др.] – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2008. – 176с.
4. Бредихин В.Н. Медь вторичная / В.Н. Бредихин, Н.А. Маняк, А.Я. Кафтаненко – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 416с.
5. Буров А.В. Литье слитков медных сплавов / А.В. Буров – М.: Металлургия, 1972.– 184с.
6. Arderiu O.G. Continuous Copper Rod Production from 100% Scrap / O.G. Arderiu, G. Properzi // Proc. 65th Annual Convention of the Wire Association International. Atlanta, Georgia, USA, March 1995. – Wire Journal International, 1996. – P.75-82.
7. Смирнов А.Н. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, С.В. Момот, В.Н. Амитан – Донецк: Изд-во „ВИК”, 2002. – 170с.
8. Эльдарханов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А.С. Эльдарханов, В.А. Ефимов, А.С. Нурадинов – М.: Машиностроение, 2001. – 208с.
9. Thomas B.G. Continuous casting: Complex Models / B.G. Thomas // The Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Vol.2. – Oxford: Elsevier Science Ltd. 2001. – P.1599-1609.



10. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009, №1. – С.33-42.
11. Смирнов А.Н. Моделирование условий деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // Металл и литье Украины. – 2009, № 7-8. – С.69-74.

Надійшла до редакції 01.11.2011

Рецензент к.т.н., доц. В.В. Кочура

© Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Шутов И.В., Головатый В.А.

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

К.Л. Шпилевой, Ю.В. Костецкий

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАВКИ НЕФЕЛИНОВОЙ РУДЫ

Рассмотрена принципиальная возможность проведения восстановительной плавки нефелинового сиенита с получением электрокорунда. Проведены термодинамические расчёты и экспериментальные исследования данного процесса.

Ключевые слова: нефелиновый сиенит, электрокорунд, компьютерное моделирование, восстановительная плавка.

### Введение

В Государственной программе развития минерально-сырьевой базы Украины на период до 2030 года отмечается, что существующий минерально-сырьевой комплекс не удовлетворяет потребности отечественных предприятий керамической промышленности в полевошпатовом сырье [1]. Ежегодно в Украину ввозятся приблизительно 300 тыс. тонн полевошпатовых концентратов (преимущественно из Турции и РФ). В то же время Украина располагает значительными собственными запасами данного сырья. Эксплуатация данных месторождений может быть выгодной лишь при относительно больших объемах добычи и переработки. Так технико-экономические расчёты показывают возможность рентабельной комплексной переработки руд Мазуровского месторождения в ежегодных объёмах от 0,5 до 1,5 млн. тонн [2, 3]. Таким образом, необходимый для рентабельной отработки месторождения, объём добычи нефелиновых руд будет существенно превышать возможные объёмы её реализации внутри страны. Выходить с данной продукцией на внешние рынки, учитывая огромную конкуренцию, представляется проблематичным. Следовательно, актуальной задачей является поиск новых областей применения нефелин-полевошпатового сырья и разработка новых технологий его переработки в товарную продукцию.