

Розглянуто процес кристалізації зливка з врахуванням переносу домішок у дендритному каркасі. Наведено двовимірну математичну модель кристалізації зливка з врахуванням переносу домішок. Надано різницеву схему рівнянь фільтраційного руху розплаву в дендритному каркасі.

Фільтраційний рух впливає на формування хімічних неоднорідностей у зливку, які утворюються завдяки механізму сегрегації, а також фізичній неоднорідності, що є важливим з точки зору практичних задач.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов / Гуляев Б.Б. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 216с.
2. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации / Авдонин Н.А. – Рига: Знание, 1980. – 189с.
3. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка / Борисов В.Т. – М.: Metallurgia, 1987. – 232с.
4. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена / Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н. – К.: Наукова думка, 2014. – 743с.
5. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / Ефимов В.А. – М.: Metallurgia, 1976. – 552с.
6. Недопекин Ф.В. Процессы переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах / Недопекин Ф.В. – Донецк: ДонГУ, 2013. – 422с.
7. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: Теоретичні основи комп'ютерного моделювання / Самохвалов С.Є. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 172с.

*Надійшла до редколегії 15.09.2014.*

УДК 669.1.785

РУДЕНКО Н.Р., к.т.н., доцент  
МУСИЕНКО К.А., к.т.н., доцент  
РУДЕНКО Р.Н. аспірант

Днепродзержинский государственный технический университет

### **АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ КОЛОСНИКОВ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН**

**Введение.** Одним из резервов повышения интенсивности доменной плавки и снижения расхода кокса является использование стабилизированного агломерата в узком диапазоне крупности с содержанием фракции 0÷5 мм менее 3÷5%. Для получения качественного агломерата на передовых агломерационных фабриках мира устанавливаются сверхмощные агломерационные машины с площадью спекания 400÷600 м<sup>2</sup>. Для таких машин необходимо предъявлять более жесткие требования к конструктивным параметрам газораспределительной колосниковой решетки агломашин.

Главным из основных параметров ленточной агломерационной машины является площадь активного сечения колосниковой решетки. Для агломашин Украины она составляет 8÷12%. Это приводит к потере до 15% мощности тягодутьевых средств [1].

В работе [2] кафедры металлургии черных металлов Днепродзержинского государственного технического университета обоснована необходимость увеличения площади активного сечения колосниковой решетки до 25%. Однако из-за конструктивных

решений колосников, их низкой стойкости не всегда удастся использовать этот резерв для улучшения качества агломерата и увеличения производительности агломерационных машин.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является анализ существующих конструкций колосников и выдача рекомендаций по повышению производительности агломашиин и качества агломерата.

Особенностью агломерационного процесса является то, что в результате возникновения отдельных зон спекаемого слоя, обладающих различным газодинамическим сопротивлением, в начальном периоде процесса спекания газопроницаемость слоя резко падает и некоторое время держится на минимальном значении, после чего начинает резко возрастать. Наряду с этим, в начальном периоде процесс идет с меньшим коэффициентом избытка воздуха. Поэтому небольшая площадь активного сечения решетки может даже не оказывать сдерживающего влияния на расход воздуха в начале процесса агломерации, но лимитировать его в основной и заключительные периоды. Повышение производительности агломерационной машины с увеличением площади активного сечения объясняется уменьшением сопротивления решетки и ростом количества просасываемых газов, а также более равномерным распределением газового потока.

Для повышения площади активного сечения колосниковой решетки необходимо увеличение зазора между колосниками. Но это приведет к увеличению крупности заврата, используемого в качестве подстилочного материала. Учитывая, что многие агломерационные машины работают без постели, такое решение невозможно.

Второй путь – это снижение толщины колосников. Для этого необходима конструкция колосника, более стойкая к износу и способная к самоочищению и изготовленная из жаропрочных и абразивноустойчивых марок стали.

**Результаты исследований.** Агломерационное производство характеризуется весьма тяжелыми условиями работы. Узлы и агрегаты большинства машин при эксплуатации подвергаются совместному интенсивному воздействию механических нагрузок абразивных материалов, высоких температур, химически агрессивных сред. Условия работы определяют предъявляемые к ним требования.

Например, средняя по площади агломашина типа АКМ-312 ОАО „ЕВРАЗ ЗСМК”, температура газа, покидающего колосниковое поле, находится в пределах  $200\div 250^{\circ}\text{C}$  (достигая максимума  $450^{\circ}\text{C}$ ) [3]. Учитывая работу без постели, на машинах типа АКМ-75 температура корпусов спекательных тележек достигает  $430\div 480^{\circ}\text{C}$ , а температура верхних подколосниковых балок –  $530\div 680^{\circ}\text{C}$ .

Основной причиной обгорания и коробления колосников является образование в слое шихты вблизи колосникового поля очагов спекания с температурой до  $1000\div 1200^{\circ}\text{C}$ , которые возникают из-за скопления на колосниках крупных частиц топлива (коксыка) и отсутствия защитного слоя из подстилочного материала.

На рис.1 представлены фотографии колосников различных типов. Они изготавливаются как с чугуна, так и стали.

На рис.2 представлена конструкция колосника [4], боковые и нижние части которого выполнены из жаропрочного бетона. При этом внутренняя часть колосника выполнена из углеродной стали. Такая конструкция, по мнению авторов, должна сохранить геометрические размеры колосников и зазоры между ними в ходе периода эксплуатации.

Жаропрочный бетон обеспечит стойкость к выгоранию колосников в атмосфере агломерационных газов при температуре  $1300\div 1500^{\circ}\text{C}$ . Предложенная модель колосника из жаропрочного бетона и стальной арматуры может быть использована для стационарно установленных аглочаш периодического действия. При движении спекательных тележек колосниковая решетка выдерживает значительные температурные перепады



Рисунок 1 – Колосники конвейерных агломерационных и обжиговых машин

20÷1500°C), удары материала при загрузке, залипание щелей жидкими продуктами агломерации, разгрузку агломерата и движение колосников при переходе с рабочей ветви на холостую. Поэтому, на наш взгляд, стойкость колосниковой решетки с комплектацией таких колосников не позволит эксплуатировать агломашину продолжительное время.

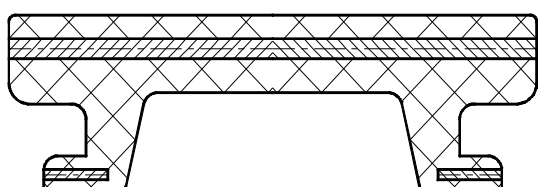


Рисунок 2 – Колосник, футерованный жаропрочным огнеупорным бетоном [4]

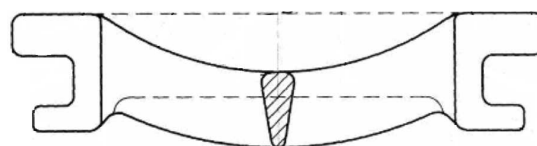


Рисунок 3 – Колосник с вогнутой рабочей частью [5]

Нетрадиционная конструкция колосника (рис.3) [5] с вогнутой рабочей частью в продольном сечении. Такая конструкция должна обеспечить, по мнению авторов, повышение производительности агломерационных или обжиговых машин за счет увеличения объема шихты или окатышей, укладываемого на колосниковую решетку, без увеличения высоты материала над колосниковыми балками, а также долговечность колосников.

Во-первых, на производительность машины влияет газопроницаемость шихты, во-вторых, увеличивается площадь контакта решетки с агломератом, который приведет к повышению износа колосников и, в-третьих, конструкция этого колосника ухудшит выгрузку агломерата и самоочистку системы колосниковой решетки, работающей без подстилочного материала, при разгрузке.

Колосник спекательной тележки агломерационной машины российских авторов

[6] также имеет некоторые недостатки. Во-первых, это плоская поверхность колосника, контактируемая с шихтой (рис.4). Острые углы колосника разрушат гранулы сырой шихты, и они будут проваливаться в зазоры, уменьшая площадь активного сечения агломашинны.

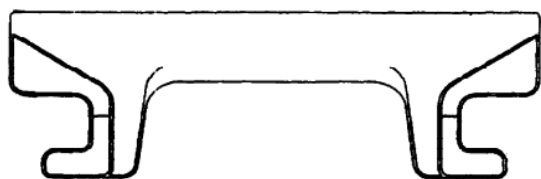


Рисунок 4 – Колосник с плоской рабочей поверхностью и закругленными скосами [6]

Авторы колосника [7] выполнили дистанционные планки, смещенные относительно друг друга. Это исключит: перекрытие зазоров между колосниками, смещенные относительно друг друга. Это исключит: перекрытие зазоров между колосниками, смещение расположения в системе колосниковой решетки и перегрев подколосниковых балок тележки (рис.5). За счет этого повышается срок эксплуатации колосников и решетки в целом.

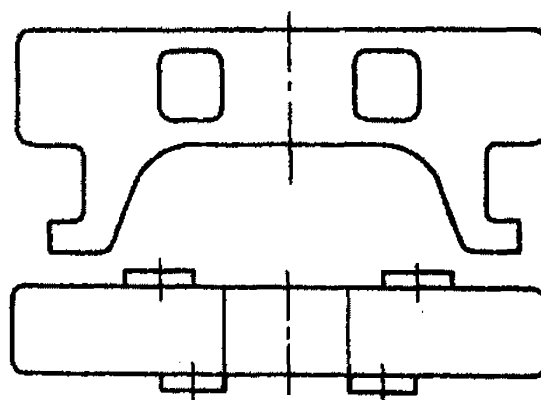


Рисунок 5 – Колосник со смещенными дистанционными планками [7]

На наш взгляд, такое расположение дистанционных планок уменьшит площадь активного сечения колосниковой решетки.

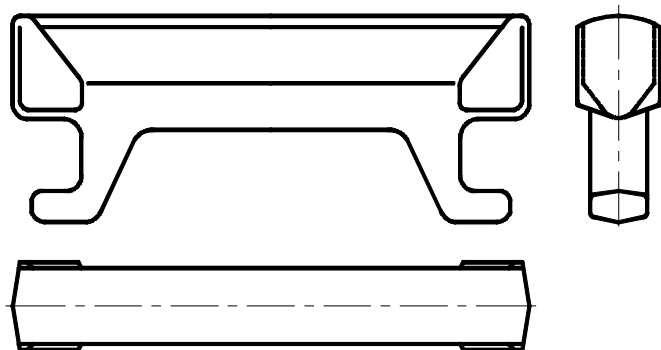


Рисунок 6 – Колосник с дугообразной рабочей поверхностью [8]

Разработчиками [8] предлагается повысить стойкость колосника (рис.6) за счет более равномерного распределения тепла от рабочей зоны колосника по всей его длине. Это будет достигаться за счет изменения конструкции среднего сечения тела, выполненного с верхней рабочей дугообразной поверхностью по форме дуги треугольника Релло, а также выполнения нижних боковых поверхностей в виде выпуклых частей относительно вертикальной оси колосника. Увеличение

высоты колосника в средней части позволит снизить температуру его поверхности, контактируемой с шихтой, и повысить прочность колосника в самой нагруженной его рабочей части.

Одна из задач колосниковой решетки [9] – обеспечение постоянства площади активного сечения колосниковой решетки за счет самоочистки и стойкости. Расположение общего выступа в виде прямоугольника на боковых поверхностях головки, замка и его упора позволит, по мнению авторов, увеличить подвижность колосников в вертикальной плоскости при переходах с рабочей на холостую ветвь агломерационной машины (рис.7). Дополнительно выполненные выступы на боковой поверхности колосника позволят при перемещении осуществить их равномерное расположение между собой и, особенно, в горизонтальной плоскости.

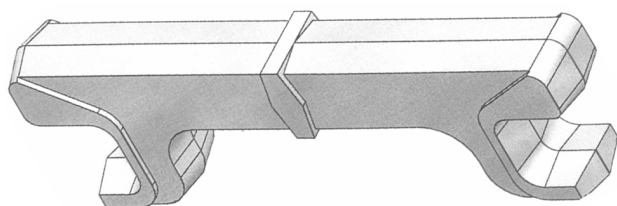


Рисунок 7 – Колосник с дополнительными выступами на боковой поверхности [9]

Удачной конструкцией колосника агломерационной машины является модель авторов [10]. Эта конструкция (рис.8) используется на многих агломерационных машинах Украины. Колосник имеет повышенную стойкость к абразивному износу. Решетка эффективно самоочищается. Это позволяет значительное

время удерживать площадь активного сечения на постоянном уровне.

Изобретателями ОАО „Днепровский меткомбинат” получено несколько патентов на полезные модели колосников [11, 12] и способ их изготовления [13].

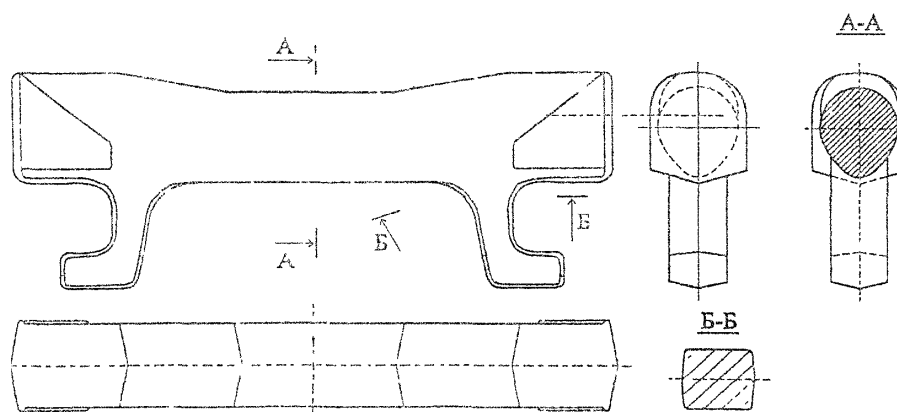


Рисунок 8 – Колосник [10]

Конструкция колосника [11] (рис.9) дает возможность повысить самоочищение и его стойкость. Разделение тела колосника на рабочую часть, замки с зевами и нижними упорами позволило изготавливать его способами прокатки верхней рабочей части, порезки и сварки с нижней частью.

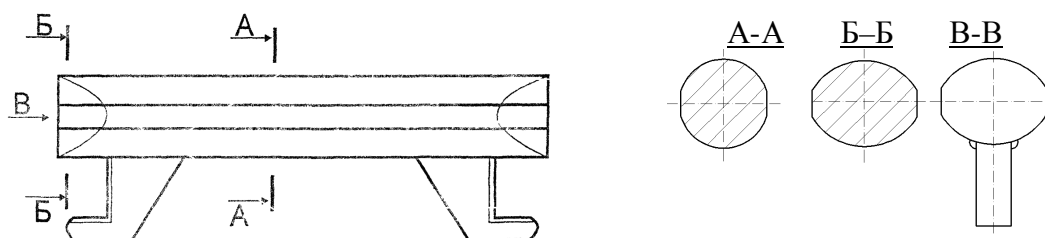


Рисунок 9 – Колосник [11], изготовленный методами прокатки верхней части и сварки с нижней частью

Разработка [12] отличается тем, что основное тело колосника изготовлено из специального горячекатаного периодического профиля, который представляет собой овал с площадками на диаметрально противоположных сторонах (рис.10).

Эксплуатация таких колосников (рис.9, 10) показала низкую прочность сварных соединений. Это приводило к изменению геометрии крепежной части или выпадению колосника из системы колосниковой решетки. Способ изготовления [13] колосников предусматривает использование специального горячекатаного профиля периодического сечения вместо литья и порезку на отдельные части. Поэтому такие конструкции колосников оправдывают себя низкой себестоимостью, возможностью изготовления и

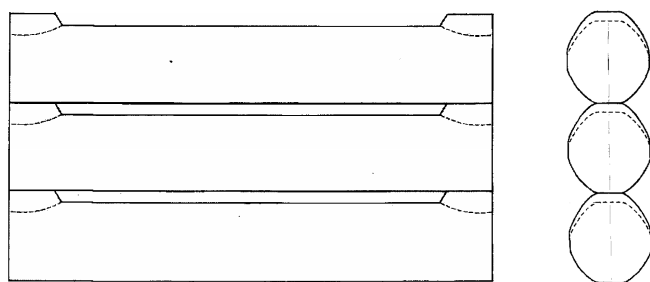
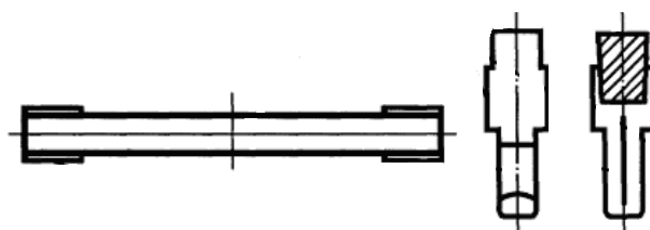
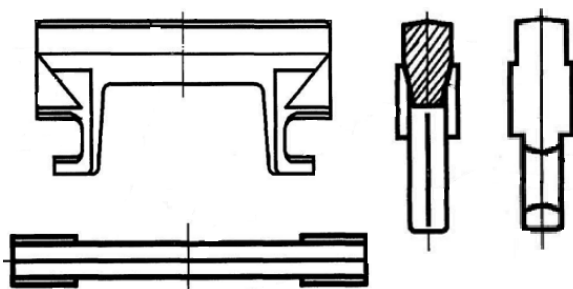


Рисунок 10 – Колосник горячекатаного периодического профиля [12]



а



б

а – [14], б – [15]

Рисунок 11 – Колосники многогранные

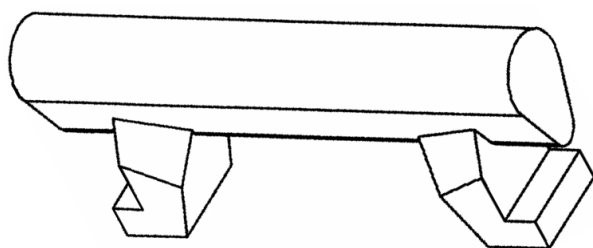


Рисунок 12 – Колосник с разнесенными по высоте частями [16]

повторного передела на собственном производстве.

Нужно отметить ряд моделей (рис.11, а) [14] и (рис.11, б) [15] Криворожского технического университета. Колосники и система колосниковой решетки решают вопросы увеличения площади живого сечения агломерационной машины и повышения долговечности.

Одним из недостатков конструкций (рис.11), на наш взгляд, является рабочая многогранная часть колосников, выполненная с острыми углами. Это приведет к частичному разрушению гранул аглошихты или окатышей и ухудшению газопроницаемости слоя. Крепежная часть с многими составляющими, имеющими острые углы, будет находиться в зоне высоких температур и подвергаться при этом повышенному износу.

Для улучшения условий спекания Днепродзержинским государственным техническим университетом совместно с коллективом ОАО „Днепропетровский меткомбинат” разработан колосник [16], выполненный с разнесенными по высоте крепежной частью и рабочим телом. Это обеспечит уменьшение тепловых нагрузок на нижнюю крепежную часть колосника и подколосниковые балки. Увеличение длины рабочего тела колосника увеличит площадь активного сечения агломашин (рис.12). Округлая рабочая поверхность улучшит его аэродинамику, газопроницаемость шихты особенно над верхней частью рабочего тела.

Это приведет к равномерному спеканию шихты, повышению производительности агломашин и стойкости системы колосниковой решетки.

**Выводы.** Рассмотрены различные конструкции колосников агломерационных и обжиговых машин. Для различных условий производства агломерата предложены ва-

рианты полезных моделей колосников и системы решеток с целью повышения качества агломерата, производительности и снижения затрат материальных и энергетических ресурсов.

## ЛІТЕРАТУРА

1. О возможности дальнейшего совершенствования конструкций агломерационных лент / Е.Ф.Вегман, А.Р.Жак, Е.А.Романчиков и др. // Сталь. – 1994. – № 3. – С.7-12.
2. Бондаренко В.Д. Исследование влияния активного сечения колосниковой решетки на показатели агломерационного процесса и разработка рациональной конструкции колосников / Бондаренко В.Д., Руденко Н.Р. // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 1-2. – С.24-27.
3. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин / Ю.А.Фролов // Сталь. – 2005. – №6. – С.42.
4. Патент 48107 Україна, МПК F27B 21/08. Колосник спікального візка агломераційної конвеєрної машини / Л.О.Іванова, М.О.Косіцин, І.І.Шофул. – №200908815; заяв. 25.08.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.
5. Патент 44490 Україна, МПК F27B 21/06. Колосник рухомого візка агломераційної або обпалювальної конвеєрної машини / Ю.С.Рудь, В.Г.Кучер, А.З.Крижевський. – №200902961; заяв. 30.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19.
6. Патент 2343386 Россия, МПК F27B 21/08. Колосник спекательной тележки агломерационной конвейерной машины / А.И.Гамей, В.Ю.Савинов, В.И.Коротков и др. 2007111206; заяв. 27.03.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
7. Патент 26112 Україна, МПК F27B 21/08. Колосник агломераційної або обпалювальної машини / О.Г.Сагінор, О.П.Войтенко, Д.М.Габриелян та ін. – №4671231; заяв. 03.04.1989; опубл. 30.04.1999, Бюл. № 2.
8. Патент 63852 Україна, МПК F27B 21/08. Колосник агломераційного візка / В.С.Бойко, В.В.Кліманчук, П.М.Кирильченко та ін. – №2003109701; заяв. 29.10.2003; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
9. Патент 902 Україна, МПК F27B21/06. Колосникова решітка конвеєрної машини / Ю.Р.Руденко, В.В.Пихтін, М.Р.Руденко та ін. – №2000095240; заяв. 12.09.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
10. Патент 896 Україна, МПК F27B21/06. Колосникова решітка конвеєрної машини / Ю.Р.Руденко, В.В.Пихтін, М.Р.Руденко та ін. – №2000095197; заяв. 08.09.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
11. Патент 871 Україна, МПК F27B21/06. Колосникова решітка агломераційної машини / Ю.Р.Руденко, В.В.Пихтін, М.Р.Руденко та ін. – №2000087400; заяв. 07.08.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
12. Патент 580 Україна, МПК F27B21/00. Колосникова решітка спікального візка агломераційної машини/ О.М.Ревякін, Ю.В.Гірін, А.С.Крижжановський та ін. – №99042397; заяв. 27.04.1999; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5.
13. Патент 40752 Україна, МПК B21H8/00. Спосіб виготовлення колосників / О.М.Ревякін, Л.О.Анісімов, С.С.Бродський та ін. – №99042396; заяв. 27.04.1999; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7.
14. Патент 48811 Україна, МПК F27H 11/00. Система колосникових грат рухомих візків агломераційних або обпалювальних машин / Ю.С.Рудь, В.Г.Кучер. – №200906734; заяв. 26.06.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7.
15. Патент 53599 Україна, МПК F27B 21/00. Колосник візка агломераційної або обпалювальної конвеєрної машини / Ю.С.Рудь, В.Г.Кучер. – №201004638; заяв. 19.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.
16. Патент 76601 Україна, МПК F27B21/06. Колосник візка агломераційної конвеєрної машини / М.Р.Руденко, К.А.Мусієнко Р.М.Руденко, та ін. – №201207527; заяв. 20.06.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

Поступила в редколлегию 12.05.2014.

Днепродзержинский государственный технический университет

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ Zr–Cu**

**Введение.** Одной из наиболее важных проблем в свете практического использования металлических стекол является степень устойчивости аморфного состояния. Так как стеклообразное состояние нестабильно, любой аморфный металлический сплав при нагреве переходит в более устойчивое кристаллическое состояние. Мерой термической стабильности аморфного состояния является температура начала кристаллизации  $T_k$ , зависящая от скорости нагрева и экспериментально определяемая как минимальная температура, при которой наблюдается резкое увеличение скорости кристаллизации.

Отжиг металлических стекол при температурах ниже  $T_k$  сопровождается изменением некоторых свойств (увеличением удельного электросопротивления, коэрцитивной силы, механической хрупкости). Необычный характер изменения электрических свойств с температурой делает возможным применение металлических стекол в качестве электрических резисторов с нулевым или отрицательным значением ТКС, а также для изготовления низкотемпературных термометров сопротивления [1]. Поэтому проблема температурно-временной стабильности аморфного состояния и физико-механических свойств аморфных сплавов является одной из актуальных проблем современного материаловедения.

**Постановка задачи.** Изучить влияние химического состава, а также режимов быстрой закалки и последующего нагрева на термическую устойчивость структуры быстроохлажденных аморфных сплавов Zr–Cu, а также особенности их перехода в равновесное состояние.

**Результаты работы. Методика эксперимента.** Согласно поставленным задачам проводился резистометрический анализ быстрозакаленных фольг в процессе непрерывного нагрева и рентгенофазовый анализ образцов на разных этапах структурных превращений. Для исследования были взяты аморфные фольги сплавов  $Zr_xCu_{100-x}$  ( $x = 62, 55, 50, 44, 41, 38$ ), полученные закалкой из жидкого состояния по методике, описанной в работе [2]. Удельное электросопротивление (УЭС) исследуемых образцов размерами  $26 \times 2 \times 0,05$  мм измерялось в процессе непрерывного нагрева со скоростями  $v \approx 0,08-0,33$  К/с от комнатной температуры до температуры перехода сплавов в равновесное кристаллическое состояние в рабочем объеме вакуумного поста ВУП-5М (вакуум  $10^{-3}$  Па) четырехзондовым потенциометрическим методом, основанным на сравнении падения напряжения на образце и эталоне [3]. По результатам резистометрических исследований были получены зависимости УЭС от температуры. Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов на разных этапах структурных превращений проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом  $Cu_{K\alpha}$ -излучении ( $\lambda = 0,154051$  нм). Съемку дифрактограмм вели в интервале углов отражения  $2\theta = 20-100^\circ$ . Фазовый состав исследуемых образцов определяли сравнением экспериментальных наборов межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей дифракционных максимумов со справочными данными картотеки ASTM.