

УДК 621.745.669.13

## МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ БЫСТРООХЛАЖДЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С НЕРАВНОВЕСНОЙ СТРУКТУРОЙ

**В.А. ШЕЙНЕРТ, А.Г. СЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет  
**А.С. КАЛИНИЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Д.В. КУИС**, канд. техн. наук  
Белорусский государственный технологический университет  
**И.А. КАСПЕРОВИЧ, Е.А. МАЛЫШКО**  
Белорусский национальный технический университет

*Выполнен анализ промышленно реализуемых сплавов на основе меди, алюминия и железа, способных к образованию метастабильных и неравновесных структур, позволяющих резко повысить их служебные свойства. Проанализированы некоторые известные способы реализации скоростного затвердевания из жидкой фазы, позволяющие получать высокую степень переохлаждения расплава, что способствует формированию неравновесных и метастабильных структур, вплоть до аморфного состояния, на основании которых будут изготовлены лабораторные установки для получения быстрозакаленной металлической фольги и металлического волокна (фибры).*

*Ключевые слова:* высокоскоростное затвердевание, металлическая фольга и микроволокно, способы получения.

## METHOD OF OBTAINING RAPIDLY QUENCHED METALLIC MATERIALS WITH A NONEQUILIBRIUM STRUCTURE

**V.A. SCHEINERT, A.G. SLUTSKY**, Ph. D in Technical Sciences  
Belarusian National Technical University  
**A.S. KALINICHENKO**, Dr of Engineering Sciences, **D.V. KUIS**,  
Ph. D in Technical Sciences  
Belarusian State Technological University  
**I.A. KASPEROVICH, E.A. MALYSHKO**  
Belarusian National Technical University

*The analysis of industrially realized alloys based on copper, aluminum and iron, capable of forming metastable and nonequilibrium structures, allowing to dramatically increasing their service properties, is carried out. The known*

*methods of realization of rapid solidification from the liquid phase are analyzed, allowing to obtain a supercooled state, up to the amorphization of the structure, on the basis of which laboratory installations will be manufactured to produce a rapidly quenched metal foil and metal microfiber.*

**Keywords:** *rapid solidification, metal foil and microfibre, methods of production.*

Существующие методы повышения физико-механических и эксплуатационных свойств, основанные на легировании, практически исчерпали свой ресурс. Несомненный научный и практический интерес представляет разработка композиционных сплавов с использованием преимуществ неравновесных структур армирующей фазы. С этой точки зрения представляют интерес литые материалы, полученные методом высокоскоростного затвердевания. В конкретном случае формируются неравновесные структуры, резко повышающие физико-механические свойства материалов.

Не рассматривая технологии поверхностной обработки высокоинтенсивными потоками энергии, остановимся на литейных технологиях, позволяющих получать армирующую фазу для композиционных материалов. Быстроохлажденные литые материалы можно получать различной формы (нитевидная, хлопьевидная, ленточная) в зависимости от конструктивных особенностей литейных установок [1–3]. Это позволяет не только модифицировать структуру литых заготовок, приближая ее к строению композитов, но и использовать их для формирования композиционных материалов с матрицей на основе пластиков. Варьируя формой частиц, можно получать изделия с изотропными свойствами, или с заданной анизотропией. Применение быстроохлажденных частиц с неравновесной структурой позволяет также заметно повысить физико-механические свойства изделий, снизить их массу и обеспечить конкурентоспособность изделий.

Из многих возможных вариантов выбраны сплавы на алюминиевой, медной и железной основе с широкими областями твердых растворов, выраженными эвтектиками типа металл-металл и металл-металлоид, и проанализированы известные способы скоростного затвердевания из жидкой фазы, позволяющие получать глубокое переохлажденное расплава, что обеспечивает формирование неравновесных, метастабильных структур, вплоть до аморфного состояния.

На основании сделанного анализа разработаны практические варианты реализации лабораторных методик.

На рисунке 1 показана схема установки для получения фибры, предусматривающая экстракцию погружным вращающимся кристаллизатором (1) волокон (10) из плавильного тигля (6) с расплавом через специальный дозатор (8). Процесс осуществляется в две стадии – приготовление исходного расплава и последующее затвердевание на кромке вращающегося охлаждаемого диска. Этот способ хорошо известен, однако практически реализуем для сплавов с температурой плавления ниже 1300 К и требует учета ряда особенностей процесса, аппаратной стабилизации основных параметров, в результате чего установки для его успешной реализации достаточно сложны. Результатом затвердевания по этому способу является быстрозакаленное, непрерывное или штапельное металлическое волокно с ультрадисперсной неравновесной структурой, вплоть до аморфного состояния. Предполагается реализация этого способа на лабораторной установке при получении быстрозакаленного волокна из алюминиевых и медных сплавов.

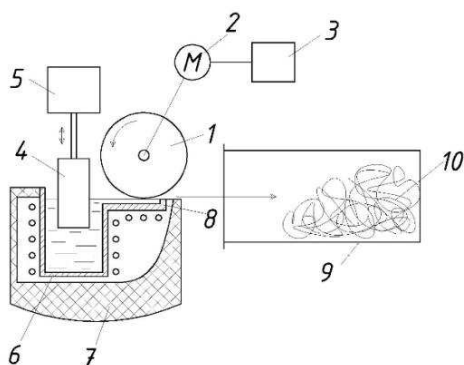


Рисунок 1 – Установка для получения переохлажденного металлического волокна (фибры):

1 – вращающийся водоохлаждаемый кристаллизатор; 2 – электродвигатель привода кристаллизатора; 3 – система стабилизации скорости вращения кристаллизатора; 4 – вытеснитель расплава; 5 – система перемещения вытеснителя; 6 – плавильный тигель; 7 – электропечь для плавки и поддержания температуры расплава; 8 – дозатор расплава; 9 – сборник волокна; 10 – волокно

Установка, приведенная на рисунке 1, не отличается принципиальной новизной, однако для устойчивой реализации процесса получения волокна с приведенным диаметром меньше 100 мкм необходимо применение некоторых специальных технологических приемов. В частности, ванна экстрагируемого сплава представляет собой узкую щель, отходящую от плавильного тигля, где расплав поднимается до кромки кристаллизатора в виде мениска и благодаря поверхностному натяжению не имеет волнообразных колебаний. Как результат, разность толщин получаемого волокна не превышает 20 %. Подача расплава из тигля осуществлялась вытеснителем, оснащенным регулируемым, стабилизированным микроприводом, и в сочетании с виброизоляцией тигля от привода кристаллизатора позволяет свести к минимуму колебания уровня расплава в щели дозатора. Установка снабжается механическим противофазным гасителем вибраций, что позволяет подавить колебания системы от несбалансированных вращающихся масс.

Следует отметить, что привод вращения кристаллизатора необходим с электрической стабилизацией частоты вращения двигателя, ременная передача должна иметь успокоители колебаний ремня, а система охлаждения – повышающий насос для преодоления гидравлического клина, возникающего при вращении кристаллизатора.

Благодаря вышеприведенным технологическим приемам осуществления процесса кристаллизации возможно получение любого волокна из алюминиевых сплавов толщиной вплоть до 50 мкм, что позволяет обеспечить скорость охлаждения расплава порядка  $10^6$  К/с.

На рисунке 2 представлена схема видоизмененного способа двухвалкового литья, реализуемого в варианте двух сжимаемых и вращающихся навстречу охлаждаемых валков (1) с подачей расплава (6) в зазор между ними для получения закаленных и аморфных фольг и лепестков. Это наиболее универсальный способ для получения неравновесных метастабильных металлических структур, обеспечивающий скорости охлаждения расплава до  $10^6$  К/с в слоях толщиной до  $20 \cdot 10^{-6}$  м с одновременным динамическим механическим воздействием на затвердевающий сплав в интервале кристаллизации. Способ обеспечивает получение сверхмелких зерен и аморфного состояния (для железоуглеродистых сплавов) получаемых фольг. Кроме того, способ малочувствителен к таким парамет-

рам исходного расплава как вязкость, поверхностное натяжение, адгезия к поверхности кристаллизатора и применим для закалки из жидкого состояния как низкоплавких, так и тугоплавких сплавов в неравновесном состоянии.

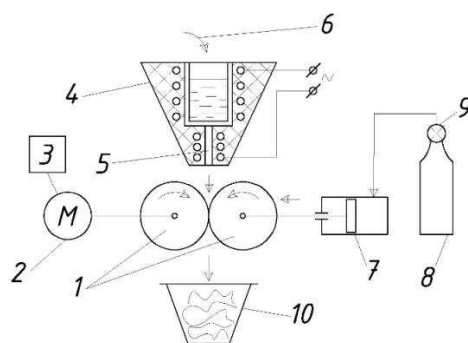


Рисунок 2 – Установка для получения быстрозакаленной металлической фольги:

- 1 – вращающиеся водоохлаждаемые валки; 2 – регулируемый электропривод вращения валков; 3 – система стабилизации вращения валков;
- 4 – электрообогреваемый дозатор расплава; 5 – калиброванная кварцевая трубка для подачи расплава; 6 – исходный расплав из плавильной печи; 7 – поршневой привод сжатия валков; 8 – газовый аккумулятор; 9 – регулятор давления;
- 10 – сборник полученной фольги

Установка по схеме 2 известна во многих вариантах, однако для получения стабильной по толщине фольги необходимо применить синхронный механический привод обоих кристаллизаторов с гасителем крутильных колебаний, исключающий относительное проскальзывание валков при высоких скоростях вращения. Кроме того, необходим безинерционный регулируемый пневматический механизм прижатия рабочих поверхностей кристаллизаторов, снабженный гидравлическим демпфером. Это позволяет минимизировать механические колебания в системе, вызванные неравномерностью подачи расплава в зазор валков. Для стабилизации подачи расплава применяется дозатор с обогревом калиброванной трубкой или щелью, находящейся под стабильным уровнем в металлоприемнике. Для снижения вибраций от дисбаланса вращающихся масс валки кристаллизаторов необходимо оптимально смонтировать на неподвижных трубчатых валках, служащих одновременно для подачи

и отвода охлаждающей воды. Такое решение снижает влияние гидравлического клина при вращении валков с высокими скоростями, что позволяет отказаться от применения повышающего насоса, снизить давление на входе в систему и упростить уплотнение валов.

В целом такое усовершенствование классических схем позволит стабилизировать основные параметры кристаллизации, минимизировать влияние постоянных и случайных вредных факторов и прогнозируемо управлять видом и свойствами полученных неравновесных металлических материалов.

В дальнейшем предполагается изготовление экспериментальных лабораторных установок с использованием выбранных принципов и отработка технологических режимов получения образцов сплавов с неравновесными структурами различных геометрических форм и размеров. Использование их в качестве армирующих элементов в полимерных и керамических композитах позволит получать материалы с улучшенными служебными свойствами.

#### Список литературы

1. **Mulins, W.W.** Remarks on the Evolution of Materials Science // MRS Bulletin. – 1996. – № 7. – P. 20–27.

2. **Получение** литой стабильной фибры для армирования бетонных конструкций в лабораторных условиях / В.А. Шейнерт [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2016. – № 37. – С. 132–136.

3. **Технология** получения быстроохлажденных гранул из сплавов на основе железа / А.С. Калиниченко [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2016. – № 37. – С. 85–89.

#### References

1. **Mulins, W.W.** Remarks on the Evolution of Materials Science // MRS Bulletin. – 1996. – No. 7. – P. 20–27.

2. **Poluchenie** litoj stabil'noj fibry dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij v laboratornyh usloviyah [Obtaining cast steel fiber for reinforcing concrete structures in laboratory conditions] / V.A. Shejnert [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh*

*trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2016. – Vyp. 37. – P. 132–136.

**3. Tekhnologiya polucheniya bystroohlazhdennyh granul iz splavov na osnove zheleza** [Technology of obtaining rapidly quenched granules from iron-based alloys] / A.S. Kalinichenko [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2016. – Vyp. 37. – P. 85–89.

*Поступила 22.10.2021*  
*Received 22.10.2021*