

5. Кинетика и механизм взаимодействия с водой алюминия и магния тройной системы Al-Mg-Bi / Л. Ф. Козин [и др.] // Физико-химия поверхности материалов. – 2011. – Т. 47. – С. 144–153.

6. Шепелевич, В. Г. Структура быстрозатвердевших сплавов Al-(0,25–2,0) масс. % Bi / В. Г. Шепелевич // Физика и химия обработки материалов. – 2022. – № 4. – С. 32–36.

7. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.

8. Диаграммы состояния двойных металлических систем. в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.

9. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 390 с.

### МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВА Al-7 МАСС.% BI ПРИ СПИННИНГОВАНИИ

*В. И. Гладковский<sup>1</sup>, А. И. Пинчук<sup>1</sup>, В. Г. Шепелевич<sup>2</sup>, В. М. Шилько<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь*

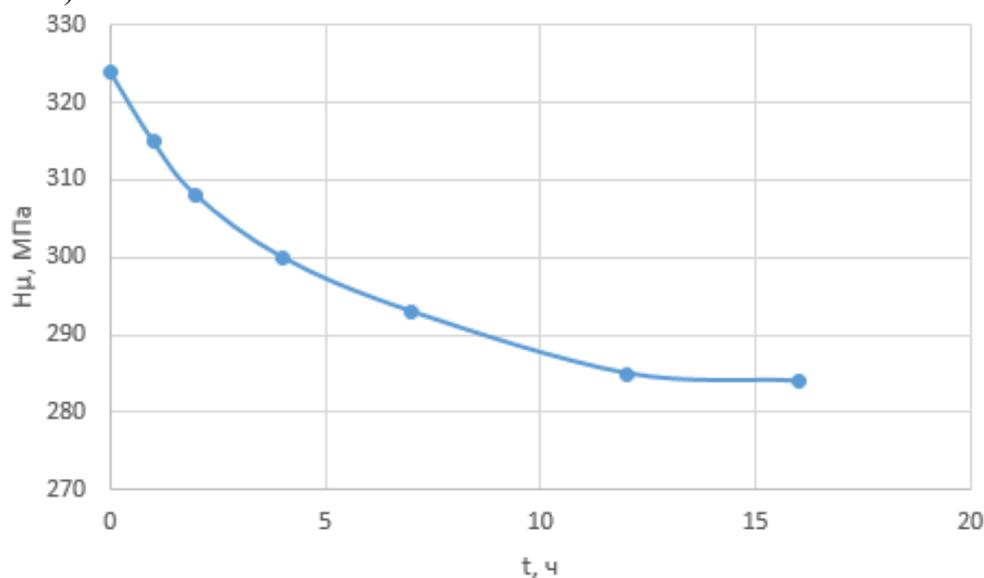
Спиннингование, то есть получение тонких лент аморфных металлических сплавов с помощью быстрого (со скоростью не менее  $10^6$  К/с) охлаждения расплава на поверхности вращающегося диска или барабана, отработано достаточно хорошо. Наиболее типичными способами получения аморфных лент и проволок методом быстрого охлаждения являются: а) закалка на вращающемся барабане; б) экстракция расплава вращающимся барабаном; в) охлаждение тонкой струи расплава. Далее аморфные лента и проволоки отжигются при контролируемой температуре для кристаллизации. Для создания нанокристаллической структуры отжиг проводится так, чтобы возникало большое число центров кристаллизации, а скорость роста кристаллов была низкой [1–5].

В последние десятилетия наблюдается существенный прогресс в развитии технологий по использованию водорода в различных областях деятельности человечества, например, в медицине, автомобильном транспорте и др. Известно, что сплавы системы алюминий – висмут при определенных условиях взаимодействуют с водой, вызывая выделение тепла и водорода. Для уменьшения стоимости получения водорода предполагается использовать алюминиевый лом (например, алюминиевые трубки из отработавших свой эксплуатационный срок холодильных установок, алюминиевый провод из выработавших свой ресурс линий электропередач, вышедшая из употребления алюминиевая посуда, отслужившие свой срок конструкционные алюминиевые изделия и др.) вместо алюминия, получаемого при помощи дорогостоящего электролиза [6–10]. Концентрация кремния и железа в алюминиевой трубке составляет  $\approx 0,3$  масс. %.

В связи с этим нами проведено исследование микротвердости сплава Al-7 масс. % Вi, изготовленного на основе алюминиевых трубок, содержащих  $\approx 0,3$  масс. % кремния и железа, и висмута чистотой 99,999 %, а также исследована его термическая стабильность путем измерения микротвердости сплава при изохронном и изотермическом отжигах.

Измерения микротвердости выполнены на микротвердомере ПМТ-3 с использованием нагрузки 20 г. Время действия нагрузки при измерении микротвердости равно 80 секунд. Значение микротвердости рассчитывалось по измерению диагоналей десяти отпечатков алмазного индентора на отполированной поверхности исследуемого сплава. Относительная погрешность определения микротвердости составила 4 %. Термическая стабильность полученного сплава исследована методом микротвердости с помощью изохронного отжига, проводимого от 20 до 160 °С через 20 °С и выдержкой при каждой температуре 30 минут, и изотермического отжига, проводимого при температуре 150 °С в течение 16 часов.

Получено, что микротвердость исследуемого сплава Al-7 масс. % Вi равна  $(323 \pm 13)$  МПа. При проведении изохронного отжига в интервале температур 100–160 °С наблюдается монотонное уменьшение микротвердости исследуемого сплава. Изотермический отжиг исследуемого сплава, проводимый при температуре 150 °С, вызывает также монотонное уменьшение микротвердости (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Зависимость микротвердости сплава Al-7 масс. % Вi от времени выдержки при изотермическом отжиге**

Изменение микротвердости на начальном этапе изотермического отжига описывается соотношением

$$(H_0 - H_t) = (H_0 - H_k) \exp(-at),$$

где  $H_0$ ,  $H_k$  и  $H_t$  – значения микротвердости при начальном, конечном и текущем времени  $t$  изотермического отжига. Расчет показал, что значение коэффициента  $a = 0,3 \text{ час}^{-1}$ .

Отношение температур изотермического отжига и начала плавления исследуемого сплава по шкале Кельвина равно  $\approx 0,45$ , т. е. при температуре 150 °С активно происходят диффузионные процессы в объеме зерен и их границах сплава, вызывающие растворение мелких частиц второй фазы (висмута) и рост более крупных его частиц [11]. Это уменьшает общее количество частиц висмута и увеличивает их средний размер и расстояния между ними. Поэтому этот процесс энергетически выгоден и приводит к уменьшению вклада дисперсионного механизма в упрочнение сплава, обуславливая тем самым уменьшение микротвердости при изохронном и изотермическом отжигах.

Таким образом, при изохронном отжиге в интервале температур 100–150 °С и при изотермическом отжиге при температуре 150 °С происходит уменьшение микротвердости, обусловленное укрупнением частиц висмута и уменьшением их дисперсионного вклада в упрочнение сплава.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / В. А. Васильев [и др.] ; под ред. Б. С. Митина. – М. : СП Интермет инжиниринг, 1998. – 400 с.
2. Шепелевич, В. Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы / В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
3. Демидчик, А. В. Сверхбыстрая закалка спиннигованием и прокаткой висмут-сурьмянистых сплавов / А. В. Демидчик, В. Г. Шепелевич // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. Сер. Машиностроение и машиноведение. Энергетика. – 2007. – № 3. – С. 17–23.
4. Верещагин, М. Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа : монография / М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ, 2004. – 133 с.
5. Shepelevich, V. G. The microstructure and microhardness of rapidly solidified foils of eutectic alloy In – 47 at. % / V. G. Shepelevich, L. P. Shcherbachenko // British Journal of Science, Education and Culture. – 2015. – Vol. 3. – № 1 (7). – P. 863–871.
6. Авраамов, Ю. С. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура, свойства) / Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М. : Интерконтакт науки, 2002. – 371 с.
7. Surface, interface and phase transitions in Al-In monotectic alloys / I. Kaban [et al.]. – Acta Mater, 2010. – V. 58. – P. 3406–3414.
8. Козин, Л. Ф. Водородная энергетика и экология / Л. Ф. Козин, С. В. Волков. – Киев : Навукова Думка, 2020. – 396 с.
9. Кинетика и механизм коррозионного растрескивания алюминия / Л. Ф. Козин [и др.] // Украинский химический журнал. – 2009. – Т. 75. – № 11. – С. 3–11.
10. Козин, Л. Ф. Кинетика и механизм взаимодействия с водой алюминия и магния тройной системы Al-Mg-Bi / Л. Ф. Козин [и др.] // Физико-химия поверхности материалов. – 2011. – Т. 47. – С. 144–153.
11. Шепелевич, В. Г. Структурно-фазовые превращения в металлах / В. Г. Шепелевич. – Мн. : БГУ, 2021. – 201 с.