

УДК 669.2

**Д. А. Милькова<sup>1\*</sup>, Э. Н. Занаева<sup>1</sup>, А. Ю. Чурюмов<sup>1</sup>, А. Иноуэ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва<sup>2</sup> Университет Джосаи, Япония\**milkovadaria@gmail.com*

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Ю. Чурюмов

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{79}\text{P}_5\text{B}_{12}\text{Si}_3\text{C}_1$** 

В работе исследовались магнитомягкие аморфные сплавы системы Fe–Ni–P–B–Si–C. Была изучена кинетика кристаллизации сплавов с использованием термического анализа при режимах: изотермической выдержки и непрерывного нагрева. В результате проведения изотермического отжига были найдены показатели Аврами и определены механизмы кристаллизации. По методу Киссинджера при непрерывном нагреве определена энергия активация.

*Ключевые слова:* аморфные сплавы, кинетика кристаллизации, показатель Аврами, метод Киссинджера

**D. A. Milkova, E. N. Zanaeva, A. Y. Churyumov, A. Inoue****STUDY OF AMORPHOUS ALLOS  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{79}\text{P}_5\text{B}_{12}\text{Si}_3\text{C}_1$  SYSTEM**

In this work, magnetically soft amorphous alloys of the Fe–Ni–P–B–Si–C system. The crystallization kinetics of alloys has been investigated different thermal analysis by means of isothermal heating and continuous heating. As a result of isothermal annealing, Avrami exponents were found and mechanisms of crystallization were determined. Using continuous heating, the activation energy was found by the Kissinger method.

*Key words:* amorphous alloys, crystallization kinetic, Avrami exponent, Kissindger method

**На** сегодняшний день наблюдается повышенный интерес к изучению магнитомягких аморфных сплавов из-за их превосходных физических и магнитных свойств. Исследование кинетики кристаллизации сплавов помогает оценить стеклообразующую спо-

способность и механизмы фазовых превращений. Ученые выявили, что процесс кристаллизации большинства аморфных сплавов является многостадийным. Понимание взаимосвязи времени и температуры превращения с количеством объемной доли закристаллизованной фазы позволяет получать композитные материалы с аморфной матрицей и нанокристаллическими включениями.

Образцы металлических лент сплавов системы  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{79}\text{P}_5\text{B}_{12}\text{Si}_3\text{C}_1$ , где за  $x$  было принято 0,5; 0,6, получили в результате быстрого охлаждения на вращающемся медном диске. Исходная структура полученных металлических лент была исследована методом рентгеновской дифрактометрии с монохроматическим  $\text{Cu K}\alpha$  излучением. Термическую стабильность материалов анализировали с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

В работе был проведен ДСК-анализ исследуемых сплавов с разными скоростями нагрева: 2, 5, 10, 20, 40 К/мин. Стоит отметить, что реакции зависимы от температуры, поэтому положение пиков на ДСК кривых изменяется при разных скоростях нагрева (рис. 1, *а*; 2, *а*). В результате видна общая закономерность уменьшения значений температуры кристаллизации с уменьшением скорости нагрева.

По модели Киссинджера был проведен расчет энергии активации сплавов ( $E_a$ ). В результате получено, что при  $x$ , равном 0,5,  $E_a$  составила 335,7 кДж/моль, а при  $x$ , равном 0,6, — 329,6 кДж/моль. Это означает, что сплав с большим содержанием никеля менее стабильный, и для протекания процесса кристаллизации необходимо затратить меньше энергии.

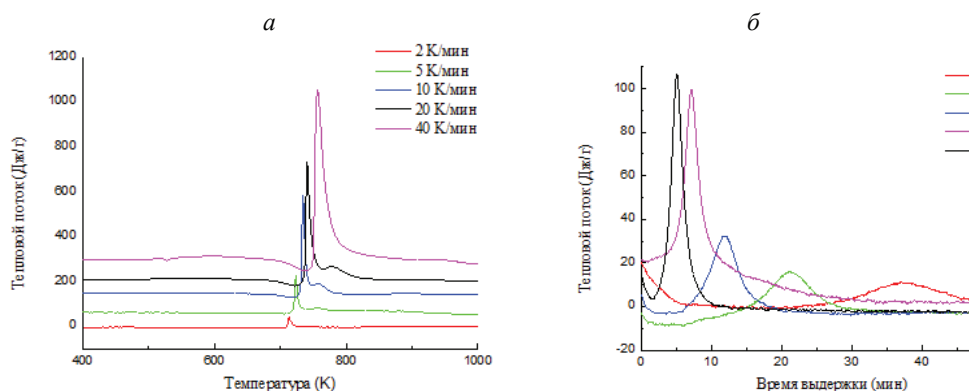


Рис. 1. Сплав системы  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{79}\text{P}_5\text{B}_{12}\text{Si}_3\text{C}_1$  при  $x = 0,5$ :

*а* — ДСК кривые при разных скоростях нагрева;  
*б* — изотермические ДСК-кривые

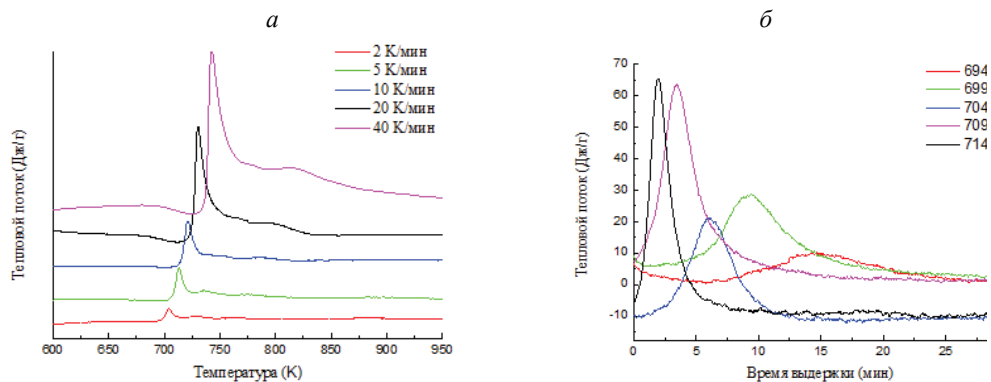


Рис. 2. Сплав системы  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)\text{79P5B12Si3C1}$  при  $x = 0,6$ :  
*a* — ДСК-кривые при разных скоростях нагрева; *б* — изотермические ДСК-кривые

Изотермическую выдержку исследуемых сплавов проводили при температуре стеклования ( $T_g$ ) и вблизи нее. Для сплава при  $x = 0,5$   $T_g$  составила 704 К, а для  $x = 0,6$ —694 К. В результате было выявлено, что при изотермической выдержке у всех сплавов наблюдается один экзотермический пик, однако величина инкубационного периода при разных температурах различна (рис. 1, б; 2, б). Стоит отметить, что чем ниже температура выдержки, тем больше инкубационный период.

Далее по формуле Джонса — Меля — Аврами были найдены показатели Аврами и константы реакции. Показатель Аврами для сплава при  $x = 0,5$  находится в диапазоне от 2,25 до 3,02, это означает, что механизм фазового превращения зависит от температуры во время изотермического отжига. При температуре отжига 694 К, 699 К и 431 К кристаллизация проходит с помощью контролируемой диффузией трехмерного роста с увеличением скорости зародышеобразования. А при температурах от 709 К кристаллизацией управляет контролируемый диффузией трехмерный рост с уменьшением скорости нуклеации.

Показатель Аврами для сплава при  $x = 0,6$  находится в диапазоне от 2,48 до 3,64. При температуре отжига от 694 К до 436 К кристаллизация проходит с помощью контролируемой диффузией трехмерного роста с уменьшением скорости зародышеобразования. А при температуре 714 К кристаллизацией управляет контролируемый диффузией трехмерный рост с постоянной скоростью нуклеации.