



УДК 669.187.58

ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ БАРАБАНА-ХОЛОДИЛЬНИКА ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕССЕ СВЕРХБЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА

В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, А. С. Мельник

Предложена математическая модель теплового состояния барабана-холодильника. Изучено влияние его геометрических размеров на скорость закалки ленты с аморфной структурой.

Mathematical model of thermal state of a drum-cooler is suggested. Effect of its geometric parameters on the rate of hardening of a strip of amorphous structure was studied.

Ключевые слова: спиннингование; сверхбыстрая закалка; барабан-холодильник; математическая модель; граничные условия

В настоящее время способы получения сплавов с аморфной структурой и микрокристаллических с применением сверхбыстрой закалки выделяются в отдельное направление в металлургическом производстве [1]. Быстрозакаленные сплавы, особенно изготавливаемые способом спиннингования в виде лент, находят все большее применение в различных областях производства. Наибольшее распространение ленты с аморфной структурой получили в области пайки, электроники, химии [2].

Однако ряд технологических и теоретических вопросов производства таких материалов не решен, что обуславливается скоротечностью процесса, слабым управлением разливкой и затвердеванием расплава, а также сложностями, связанными со значительной зависимостью их склонности к аморфизации от химического состава. Моделированию данного технологического процесса посвящено большое количество научных работ, однако основная их часть описывает процессы затвердевания расплава и формирования аморфной структуры, а исследованиям работы барабана-холодильника внимание практически не уделено. Поэтому предварительно следует изучить тепловое состояние барабана-холодильника, что позволит оценить объем металла, который можно аморфизировать на существующем оборудовании и использовать эти данные при проектировании нового. Все исследования проводились на плазменно-дуговой установке для получения

сплавов с аморфной и микрокристаллической структурой способом спиннингования, созданной в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ [2].

Постановка задачи. При сверхбыстрой закалке тонкой металлической ленты (50...100 мкм) основное охлаждение расплава осуществляется в результате контактного теплообмена с барабаном-холодильником. Поэтому такой параметр, как градиент температуры в теле барабана, играет определяющую роль в процессе аморфизации. Барабан-холодильник

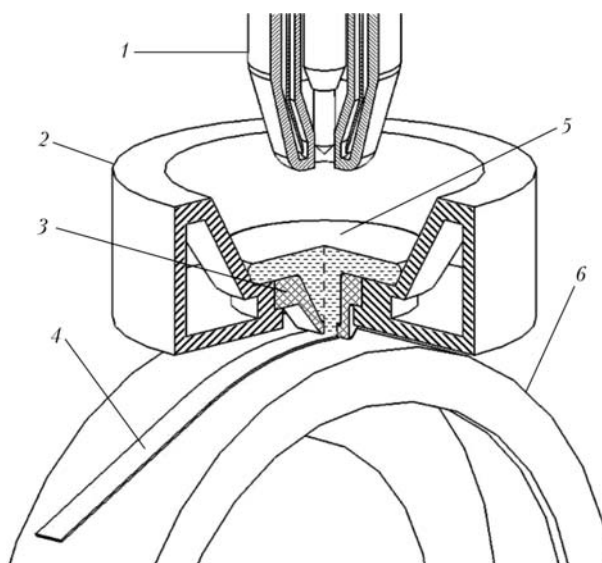


Рис. 1. Схема плавильной емкости и барабана-холодильника: 1 – плазмотрон; 2 – водоохлаждаемый тигель; 3 – сливное сопло; 4 – лента; 5 – расплав; 6 – барабан-холодильник

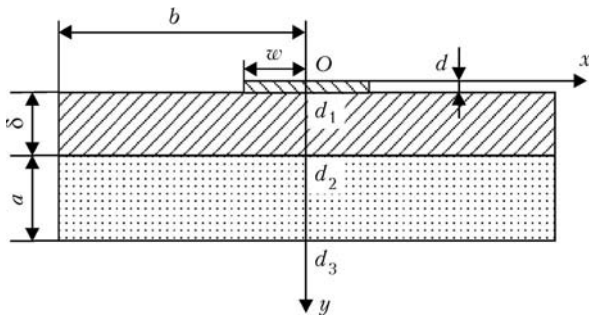


Рис. 2. Схема расчетного сечения

имеет форму полого цилиндра, внутрь которого в качестве хладагента заливается вода. На рис. 1 представлена схема плавильной емкости с керамическим сливным соплом, барабаном-холодильником и затвердевающей на нем лентой.

Цель данной работы заключалась в моделировании теплового состояния барабана-холодильника в процессе охлаждения расплава в виде ленты и изучении влияния его геометрических размеров на скорость закалки ленты с аморфной структурой.

Расчетная схема. Построим математическую модель нагрева тела барабана-холодильника в процессе охлаждения ленты толщиной d на поверхности вращающегося цилиндрического барабана, толщина контактной стенки которого $\delta = \frac{D_1 - D_2}{2}$, где D_1, D_2 — соответственно внешний и внутренний диаметры; $2b$ — ширина барабана. Начало отсчета пространственной координаты находится на внешней поверхности ленты, ось y направлена к центру барабана, а ось x — вдоль образующей цилиндра. Рассмотрим конструкцию барабана, у которого толщина стенки δ , контактирующей с расплавом, меньше ширины барабана $2b$, а ширина $2b$ меньше диаметра барабана D_1 . Представляет интерес исследовать процесс распределения тепла по ширине и высоте стенки с учетом высокой скорости вращения барабана (с периодом $n = 0,04$ с), распределением тепла вдоль ленты можно пренебречь. В этом случае тепловое состояние стенки барабана описывается двумерной моделью теплопроводности. Схематически сечение барабана и ленты дано на рис. 2.

Влияние кривизны стенки на кривую изменения температуры внутри нее можно описать коэффициентом кривизны ϕ [3]. Его значение определяется отношением диаметров $\phi = f(D_1/D_2)$ (рис. 3). Поэтому если толщина стенки цилиндра, по сравнению с диаметром, мала и отношение D_1/D_2 близко к единице, влиянием кривизны стенки можно также пренебречь. В нашем случае отношение диаметров составляет 1,056, что делает $\phi = 1$. Поэтому данную задачу можно описать элементарным двумерным уравнением в прямоугольных декартовых координатах.

При расчете исследуемое сечение последовательно проходит по всей длине окружности барабана-

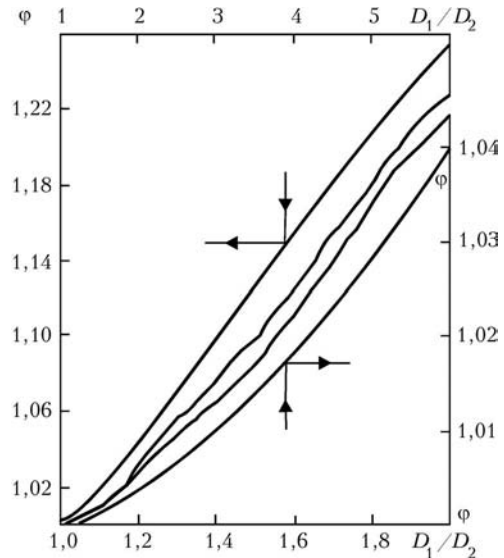


Рис. 3. Зависимость коэффициента кривизны $\phi = f(D_1/D_2)$ [3]

холодильника, к концу периода приходит в исходную точку, и процесс повторяется. В каждом новом периоде распределение температуры в начальном положении расчетного сечения равно конечному распределению температуры в последней точке предыдущего периода.

Пренебрегая конвективным перемешиванием воды и считая жидкую среду неподвижной относительно барабана, распределение тепла по сечению опишем следующим двумерным уравнением теплопроводности:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

где $T(x, y)$ — температура в точке (x, y) ; $\lambda(x, y, T)$ — коэффициент теплопроводности в точке (x, y) при температуре T ; c_p — теплоемкость; ρ — плотность вещества.

Расчетная область для ленты следующая: $0 \leq x \leq w$; $0 \leq y \leq d_1$; для барабана: $0 \leq x \leq b$; $d_1 \leq y \leq d_2$; для воды: $0 \leq x \leq b$; $d_2 \leq y \leq d_3$.

Поскольку рассматриваем задачу, симметричную относительно оси Oy , область рассмотрения ограничиваем прямоугольником $0 \leq x \leq b$, $d_1 \leq y \leq d_3$.

Сформулируем такие граничные условия: тепловой поток в плоскости симметрии отсутствует

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

плоскость $x = w$

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=w, y \leq d_1} = \alpha_{sa} (T(W, y, t) - T_{air}) - q_{rad};$$

плоскость $y = 0$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=0} = \alpha_{sa} (T(x, 0, t) - T_{air}) - q_{rad};$$

плоскость $y = d_1$



$$\begin{cases} \lambda_s(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=d_1} & = \alpha_{sc}(T(x, d_1 + 0, t) - T(x, d_1 - 0, t)) \text{ при } T_S \geq T_{fin}; \\ \lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq w, y=d_1} & = \alpha_{ca}(T(x, d_1 + 0, t) - T_{air}) \text{ при } T_S \leq T_{fin}; \\ \lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_1} & = \alpha_{ca}(T(x, d_1 + 0, t) - T_{air}); \end{cases}$$

плоскость $x = b$

$$\begin{aligned} -\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b, d_1 \leq y \leq d_2} &= \alpha_{sa}(T(b, y, t) - T_{air}); \\ -\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b, d_2 \leq y \leq d_3} &= \alpha_{wa}(T(b, y, t) - T_{air}); \end{aligned}$$

плоскость $y = d_2$

$$\lambda_c(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_2} = \alpha_{cw}(T(x, d_2 + 0, t) - T(x, d_2 - 0, t));$$

плоскость $y = d_3$

$$-\lambda_{cw}(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0 \leq x \leq b, y=d_3} = \alpha_{wa}(T(x, d_3 + 0, t) - T_{air}),$$

где $\alpha_{sa}, \alpha_{sc}, \alpha_{ca}, \alpha_{cw}, \alpha_{wa}$ — коэффициенты теплопередачи соответственно ленты-воздуха, ленты-барабана, барабана-воздуха, барабана-воды, воды-воздуха; $\lambda_s, \lambda_c, \lambda_w$ — коэффициенты теплопроводности соответственно ленты, барабана, воды.

Процесс передачи тепла между поверхностями теплообмена и окружающей средой описывается законом Ньютона-Рихмана [4]. На границе лента-воздух к конвективному теплообмену добавляется лучистый, который подчиняется закону Стефана-Больцмана и описывается граничным условием второго рода.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \text{тепловой поток, обусловленный излучением, где } \epsilon - \text{степень черноты; } \sigma - \text{постоянная Стефана-Больцмана.}$$

Существенную роль излучение играет лишь на границе лента-воздух, поскольку только при высоких температурах лучистая составляющая сопоставима с конвективной. Например, для ленты из никелевого сплава при температуре 1000 °С конвективная составляющая теплового потока достигает $7 \cdot 10^4$, лучистая — около $1 \cdot 10^4$ Вт/м² ($\epsilon(T)$ выбрали, как для чистого никеля [5]). В то же время конвективная составляющая теплоотдачи с внутренней стенки медного барабана равнялась $7 \cdot 10^3$ Вт/м² (при проведении эксперимента барабан не нагревался выше 100 °С), а лучистая составляющая имела всего около $0,5 \cdot 10^2$ Вт/м² (для оценки взято $\epsilon \approx 0,1$ [5]). Таким образом, на всех границах, кроме лента-воздух, излучением можно пренебречь.

Для решения двумерного уравнения теплопроводности выбрана схема Кранка-Никольсон [6, 7]. Вычисления производили с использованием пакета MATLAB 7.

Для сравнения результатов моделирования и практических данных выбран процесс закалки сплава системы Ni-Si-W на медном барабане. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, при экспериментах лента получена в аморфном состоянии. Высокотемпературный дифференциальный анализ показал, что первые эндотермические реакции при нагреве ленты с аморфной структурой появляются при 400 °С (673 К) [8]. Таким образом, можно сделать вывод, что температура ленты при отделении от барабана составляет ≤ 400 °С (673 К). Технологические параметры и физические данные материалов для расчета следующие [5]:

Толщина ленты d , м	.....	$1 \cdot 10^{-4}$
Толщина стенки барабана δ , м	.....	$8 \cdot 10^{-3}$
Ширина ленты $2w$, м	.....	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Ширина барабана $2b$, м	.....	$8 \cdot 10^{-2}$
Толщина слоя воды a , м	.....	$1 \cdot 10^{-2}$
Внешний диаметр барабана D_1 , м	.....	0,3
Внутренний диаметр барабана D_2 , м	.....	0,284
Период вращения барабана n , с	.....	0,04
Температура воздуха T_{air} , °С	.....	14
Начальная температура барабана $T = T_{waters}$, °С	.....	14
Начальная температура ленты T_0 , °С	.....	1050
Температура ленты в момент отрыва от барабана T_{fin} , °С	.....	400
Начальная температура воды T_{waters} , °С	.....	14
Коэффициенты теплообмена, Вт/(м ² ·К):		
ленты-воздуха α_{sa}		70
ленты-барабана α_{sc}		$5 \cdot 10^6$
барабана-воды α_{cw}		$8 \cdot 10^4$
барабана-воздуха α_{ca}		70
воды-воздуха α_{wa}		10
Коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К):		
ленты λ_s		93
барабана λ_c		389
воды λ_w		0,6

Обсуждение результатов. В результате моделирования получено распределение температур в расчетном сечении (рис. 4). Как и следовало ожидать, наибольший градиент температуры находится непосредственно под местом контакта барабана с лентой, также значительную роль в распределении температуры играет и направление по ширине сечения. Вода при данной схеме практически не оказывает существенного влияния на распределение температуры. Таким образом, основное поглощение выделившейся теплоты от расплава осуществляется телом барабана-холодильника.

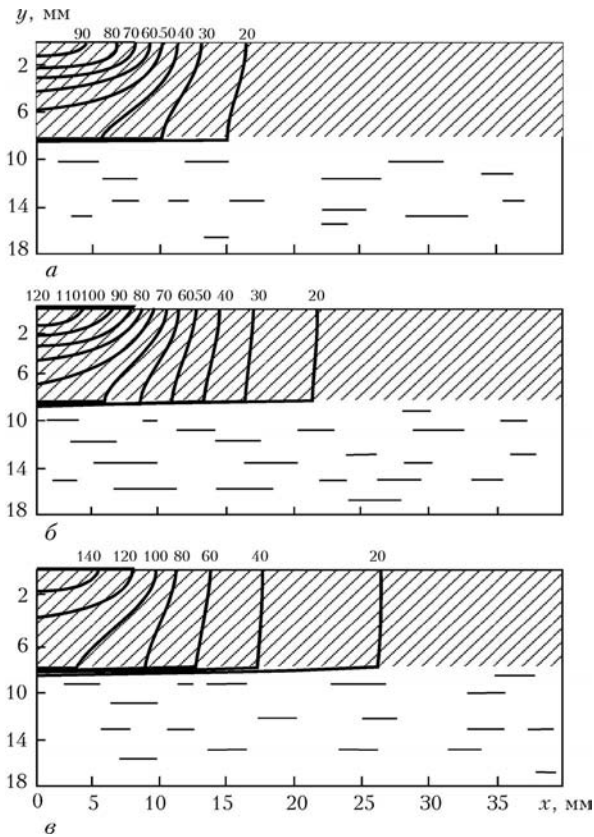


Рис. 4. Изотермы расчетного сечения при t , с: а – 1; б – 2; в – 3

Полученные результаты моделирования оценивали по скорости закалки ленты, равной $\frac{T_0 - T_{fin}}{t_k}$, где t_k – длительность контакта и охлаждения ленты на поверхности барабана. Исследования диапазона значений коэффициентов теплообмена показали, что в начальный период закалки изменение коэффициента теплообмена между расплавом и барабаном в пределах $5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ приводит к изменению скорости закалки $(1,0 \dots 6,5) \cdot 10^5 \text{ К}/\text{с}$. Изменение коэффициента теплообмена между ба-

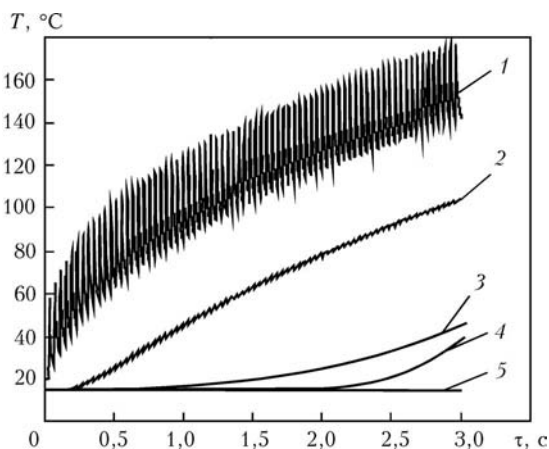


Рис. 5. Изменение температуры барабана в процессе закалки расплава: 1 – на внешней поверхности барабана d_1 ; 2 – на внутренней поверхности d_2 ; 3 – воды на расстоянии 0,4 мм от точки d_2 ; 4 – зависимость, полученная экспериментально; 5 – температура воды на границе с воздухом d_3

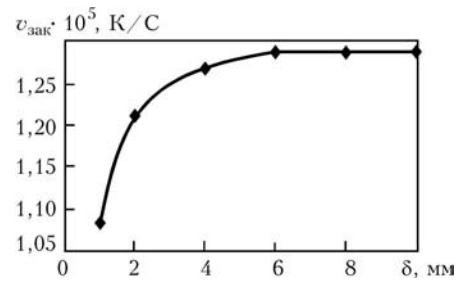


Рис. 6. Зависимость скорости закалки $v_{\text{зак}}$ (вторая секунда) от толщины контактной стенки барабана

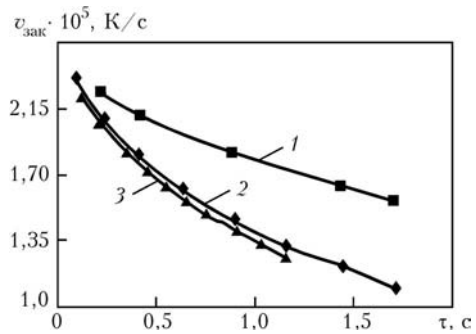


Рис. 7. Изменение скорости закалки расплава при разных диаметрах барабана-холодильника, см: 1 – 100; 2 – 30; 3 – 15

рабаном и водой в диапазоне $8 \cdot 10^2 \dots 8 \cdot 10^8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ показало его незначительное влияние на скорость закалки, что связано с неподвижностью жидкой среды относительно барабана.

Временные зависимости температуры в контрольных точках зафиксировали согласование полученных результатов с экспериментальными данными (рис. 5). Проведенные натурные эксперименты по измерению температуры внутри вращающегося барабана холодильника непосредственно под местом контакта с расплавом продемонстрировали, что за время слива (около 2,8 с) температура изменилась от 14 (287 К) до 39 (312 К) °С [9]. Принимая во внимание конструктивные особенности измерительного датчика, полученная кривая соответствует температуре воды на расстоянии 0,3... 0,5 мм от точки d_2 . Поскольку исследования проводили на небольших объемах металла, процесс слива был скоротечен, за это время температура барабана постоянно возрастала, т. е. процесс характеризовался как переходной. Расчет зависимости температуры барабана-холодильника показал хорошее согласование с экспериментальной кривой, имеющей тот же угол наклона зависимости изменения температуры от времени. Некоторое различие объясняется инерционностью измерений и упрощенной математической моделью.

Для определения критерия оптимизации конструкции барабана проведено моделирование с изменением геометрических размеров барабана-холодильника. Исследование влияния толщины контактной стенки барабана (вторая секунда слива) на скорость закалки (рис. 6) показало, что утонение стенки приводит к падению последней, а увеличение



толщины более 6... 10 мм не способствует ее качественным изменениям и останавливается на значении $1,3 \cdot 10^5$ К/с.

Изучение влияния диаметра барабана-холодильника на скорость закалки расплава во времени (рис. 7) показало падающую характеристику. С повышением диаметра угол наклона уменьшается.

При моделировании более длительного процесса закалки температура барабана асимптотически приближается к некоторой постоянной температуре, зависящей от физических свойств материалов. Это связано с тем, что теплоотвод фактически осуществляется только за счет конвективного теплообмена с окружающей средой посредством обдува барабана воздухом, что не соизмеримо с количеством подводимой теплоты от расплава. Сравнить, однако, полученные зависимости с экспериментом не представляется возможным. Для получения лент большей длины (на промышленном оборудовании) необходимо обеспечить качественный теплоотвод, постоянную циркуляцию хладагента и увеличение диаметра барабана-холодильника.

Выводы

1. Разработана математическая модель теплового состояния барабана-холодильника в процессе сверхбыстрой закалки расплава способом спиннингования.

2. В результате моделирования установлено влияние на скорость закалки ленты коэффициентов теплообмена между поверхностями лента-барабан,

барабан-вода, внешнего диаметра и толщины контактной стенки барабана.

3. Показано, что в целях оптимизации конструкции барабана его внешний диаметр должен быть максимально возможным, а толщина контактной стенки превышать 10 мм.

1. *Моделирование* процесса получения аморфной металлической ленты на основе уравнений гидродинамики и теплопроводности / Ю. А. Аникин, Ю. Б. Левин, О. А. Абдул-Фаттах и др. // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 2004. — № 11. — С. 57–60.
2. *Получение* аморфных и нанокристаллических материалов с применением плазменно-дугового нагрева (Обзор) / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 29–35.
3. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
4. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1966. — 598 с.
5. *Таблицы физических величин.* Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
6. *Петров И. Б., Лобанов А. И.* Лекции по вычислительной математике: Учеб. пособие. — М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 523 с.
7. *Яценко Н. Н.* Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967. — 196 с.
8. *Никитенко Ю. О.* Швидко загартований метал, отриманий при плазмово-дуговій плавці і спінінгуванні та його структура // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2006. — 4, № 4. — С. 797–801.
9. *Измерение* температуры барабана-холодильника в процессе сверхбыстрой закалки металла, расплавляемого в плазменной печи / В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев, Г. Ф. Торхов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 27–29.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 13.05.2008