

nificant financial and environmental losses, and sometimes human sacrifices. At the same time, fire-fighting gas blowouts in different countries have different ways and means. All known extinguishing fires gas blowouts authors are divided into five main groups: the quenching via delivery Torch jet continuous flow of extinguishing agent (the use of fire monitors, car gas-quenching, etc.), fire extinguishing using fire impulse (SPT-200, Impulse-Storm, Fire Commander, etc.), the use of explosives to disrupt and extinguishing burning torch, without delivery of extinguishing agent into the combustion zone (use of preventers and drilling directional wells) and the joint use of several approaches. In-depth analysis of all fire-fighting equipment is conducted for each of the groups, the features of each of them are identified, and also the mechanisms of flame out, which implements all of these methods when interacting with a torch is described. Based on the analysis, two more methods of extinguish gas blowouts – with the delivery of extinguishing agent into the combustion zone and without the delivery, are identified. For each of the methods, a multi-level classifier and indexer, taking into account the method of extinguishing, the form of extinguishing agent and the mechanism of flame out, are developed.

**Keywords:** gas blowout, fire extinguishing, fire fighting, classifier, indexer.

УДК 536:621.1.016

Вед. науч. сотр. Н.О. Мєранова, канд. техн. наук –  
Институт технической теплофизики НАН Украины

### СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ АМОРФИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Получено решение задачи прогнозирования объемного содержания аморфной фазы в плазменных покрытиях на базе исследования процессов теплопереноса в них и данных термокинетических диаграмм "температура-время-превращение". Изучены особенности влияния на процесс аморфизации таких факторов, как толщина напыляемых частиц, уровень их нагрева и материал основы. Представлены данные исследований, согласно которым объемное содержание аморфной фазы повышается при уменьшении толщины напыляемых частиц и увеличении коэффициента теплопроводности материала основы. Показано также, что при возрастании начальной температуры частиц выше температуры плавления материала покрытия условия аморфизации могут ухудшаться.

**Ключевые слова:** процесс теплопереноса, плазменные покрытия, термокинетическая диаграмма "температура-время-превращение", объемное содержание аморфной фазы.

**Введение.** Широкое промышленное применение плазменных покрытий из сплавов, склонных к аморфизации, обусловлено их перспективными технологическими свойствами [1-5]. Такие покрытия обладают комплексом характеристик, по уровню которых они во многом превосходят традиционные металлические материалы.

При использовании всех методов газотермического получения аморфизированных покрытий решающее значение имеет величина скорости охлаждения напыляемого материала, так как она в большой мере определяет возможность достижения аморфного состояния. Как известно, в качестве практического критерия склонности материала к аморфизации рекомендуется использовать максимальную скорость охлаждения, необходимую для предотвращения образования кристаллической фазы в количестве, поддающемся обнаружению [5].

Анализ тепловых процессов при газотермическом нанесении покрытий показывает, что каждая напыляемая частица затвердевает отдельно, не испытывая термического воздействия других частиц. Это позволяет обеспечивать вы-

сокие скорости охлаждения напыляемого материала и, соответственно, создавать условия для его аморфизации.

Таким образом, в условиях плазменного нанесения аморфных покрытий окончательный технологический результат в большой мере зависит от протекания процесса теплопереноса. При этом необходимой является организация таких температурных режимов, при которых кристаллизация расплавленных частиц была бы затруднительна. Возможность аморфизации часто оценивают по величине скорости охлаждения всего объема расплава, которую сопоставляют с ее критическим значением, необходимым для начала рассматриваемого процесса аморфизации [6]. Однако такая оценка не учитывает сложного характера процесса формирования покрытия, в частности, возможности образования наряду с аморфной фазой смешанных аморфно-кристаллических фаз, что является следствием неравномерного распределения температур и скоростей охлаждения в напыляемом слое. При прогнозировании свойств аморфизированных покрытий необходимым является определение объемных содержаний образующихся при охлаждении аморфной и кристаллической фаз [7]. Решение данной задачи может быть получено на основе совместного анализа процесса теплопереноса в покрытии и данных термокинетической диаграммы "температура-время-превращение" (ТВП-диаграммы).

**Изложение основного материала.** При прогнозировании свойств плазменных аморфизированных покрытий требуемые сведения в части их теплового состояния находились из решения задачи теплопереноса в условиях взаимодействия одиночной частицы с основой. При этом ввиду наличия в рассматриваемой ситуации существенной температурной зависимости теплофизических свойств материалов задача теплопереноса сформулирована в нелинейной постановке. Математическая модель нелинейной нестационарной задачи теплопроводности для системы "напыляемая частица-основа" представима в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) = C_{V1} \frac{\partial \theta_1}{\partial F_0}; 0 < x < \delta_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) = C_{V2} \frac{\partial \theta_2}{\partial F_0}; \delta_1 < x \leq \delta; 0 < F_0 \leq F_{0k}; \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - Bi_1 \cdot \theta_1 \right]_{x=0} = Bi_1 \cdot \theta_{C1}; \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - Bi_2 \cdot \theta_2 \right]_{x=\delta} = Bi_2 \cdot \theta_{C2}; \quad (3)(4)$$

$$\Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}; \theta_1 \Big|_{x=\delta_1} = \theta_2 \Big|_{x=\delta_2}; \quad (5)$$

$$\theta_1 \Big|_{F_0=0} = \theta_{01}; \theta_2 \Big|_{F_0=0} = \theta_{02}, \quad (6), (7)$$

где:  $\theta$  – безразмерная температура,  $\theta = t/t_{01}$ ;  $\theta_C$  – безразмерная температура окружающей среды,  $\theta_C = t_C/t_{01}$ ;  $t, t_{01}, t_C$  – текущая температура, начальная температура частицы и температура окружающей среды;  $\Lambda, C_V$  – безразмерные коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость соответственно,  $\Lambda = \lambda/\lambda_1, C_V = c_V/c_{V1}$ ;  $\lambda, c_V$  – коэффициент теплопроводности и удельная объем-

ная теплоемкость;  $x, x_p$  – безразмерная и размерная координата,  $x = x_p / \delta_{p1}$ ,  $\delta_{p1}$  – толщина растекшейся частицы;  $\delta, \delta_p$  – безразмерная и размерная толщина системы,  $\delta = \delta_p / \delta_{p1}$ ;  $Fo$  и  $Bi$  – числа Фурье и Био;  $Fo = a_1 \cdot \tau / \delta_{p1}^2$ ,  $a_1 = \lambda_1 / c_{V1}$ ,  $Bi = \alpha \cdot \delta_{p1} / \lambda_1$ ;  $\alpha, a$  – коэффициенты теплоотдачи и температуропроводности соответственно;  $Fo_{\kappa}$  – число Фурье, отвечающее концу процесса; индексы 1 и 2 относят величины соответственно к частице и основе.

Построение ТВП диаграммы осуществлялось на основе следующего соотношения [7]

$$\tau = \frac{9,3}{k \cdot T} \eta(T) \left\{ \frac{z \cdot a_0^9 \exp\left(-\frac{1,024}{T_r \cdot \Delta T_r}\right)}{f \cdot N_V \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta H_f \Delta T_r}{R \cdot T}\right)\right]^3} \right\},$$

где:  $\tau$  – время;  $\eta(T)$  – вязкость;  $a_0$  – средний атомный диаметр;  $N_V$  – количество атомов в единичной ячейке;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\Delta H_f$  – молярная теплота плавления;  $z$  – объемное содержание кристаллической фазы;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $T_r = T/T_m$ ,  $T_m$  – температура плавления;  $\Delta T_r = (T_m - T)/T_m$ ,  $f$  – относительное количество узлов на поверхности раздела кристалл-расплав, в которое могут переходить атомы при кристаллизации (для гладких поверхностей  $f = 0,2 \cdot \Delta T_r$ ).

Условия протекания процесса аморфизации исследовались для следующих систем: Fe-B, Fe-Ni-B, Fe-Ni-P-B, Fe-Cr-P-C и т.д. В качестве примера, на рис. 1 приведены результаты решения задачи об определении объемного содержания аморфной фазы для случая нанесения покрытия из сплава Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub>. Как следует из представленных данных, аморфизация металлических сплавов возможна лишь при реализации определенных технологических условий. При этом на процесс аморфизации могут оказывать влияние различные факторы. Так, если толщина напыляемых частиц  $\delta_{p1}$  не превышает  $35 \cdot 10^{-6}$  м, то температурные кривые  $t = f(\tau)$  не пересекают ветви ТВП-диаграммы. В данных условиях в покрытии образуется лишь аморфная фаза. Если значения толщины частицы больше  $100 \cdot 10^{-6}$  м, то расплавленный слой покрытия имеет полностью кристаллическую структуру. При промежуточных значениях  $\delta_{p1}$  ( $35 \cdot 10^{-6}$  м <  $\delta_{p1}$  <  $100 \cdot 10^{-6}$  м) структура покрытия характеризуется сочетанием аморфной и кристаллической фаз. Так, при  $\delta_{p1} = 40 \cdot 10^{-6}$  м объем кристаллической фазы составлял примерно 2 %.

Материал основы также может оказывать влияние на структурное состояние формирующегося в ней покрытия. Как следует из полученных данных (см. рис.), при толщинах напыляемых частиц меньших  $35 \cdot 10^{-6}$  м, в обоих рассматриваемых ситуациях – при наличии стальной и медной основы – достигалась полная аморфизация покрытия. При больших величинах  $\delta_{p1}$  (до  $40 \cdot 10^{-6}$  м) аморфная фаза образовывалась по всему объему покрытия только в случае напыления на медную основу. Последнее обусловлено значительным теплоотводом в медную основу и, как следствие, наличием более высоких, чем в случае стальной основы скоростей охлаждения покрытия.

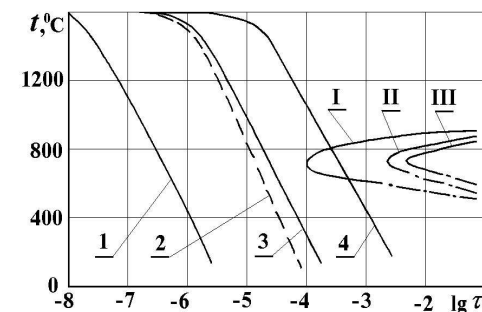


Рис. Изменение температуры на свободной поверхности напыленных частиц из сплава Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> (1-4) толщиной  $1 \cdot 10^{-6}$  м (линия 1),  $1 \cdot 10^{-5}$  м (линия 2, 3),  $4 \cdot 10^{-5}$  м (линия 4) и ТВП-диаграммы, соответствующие объемной доле кристаллической фазы  $z = 0,0001$  % (I), 10 % (II), 100 % (III); 1, 3, 4 – затвердевание на основе из стали 45; 2 – на медной основе

Полученные данные также показали, что условия аморфизации могут зависеть и от уровня нагрева частиц. Повышение начальной температуры частиц выше температуры плавления (для Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> выше 1250°C) может ухудшить условия аморфизации. Однако влияние этого фактора оказывается существенным лишь при достаточно больших величинах  $\delta_{p1}$ . Для случая напыления частиц Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> на стальную основу условия аморфизации ухудшаются при толщине частиц  $\delta_{p1} \geq 30 \cdot 10^{-6}$  м.

Рассмотренные результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по изучению условий аморфизации сплавов на основе железа, никеля, содержащих бор, фосфор, углерод и т.п. Например, наблюдается практически полное совпадение данных рентгеноструктурного анализа покрытий из сплава Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> с результатами вычислительных экспериментов по определению фазового состава. Представляет также интерес тот факт, что для указанной ситуации в зависимости от наличия или отсутствия специального охлаждения основы в покрытии реализуется соответственно аморфная структура либо аморфно-кристаллическая с содержанием аморфной фазы примерно 70 %. Эти данные отвечают нанесению покрытий толщиной  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м при размерах частиц исходного порошка  $40 \cdot 10^{-6} \dots 63 \cdot 10^{-6}$  м с использованием установки УПУ-3Д.

**Выводы.** Получено решение задачи о прогнозировании свойств плазменных аморфизированных покрытий на базе взаимосвязанного рассмотрения теплового состояния покрытий и соответствующих термокинетических диаграмм "температура-время-превращение". Представлены данные о влиянии на процесс аморфизации различных факторов, таких как уровень нагрева частиц, толщина расплавленной частицы, материал основы и пр.

### Литература

1. Masahiro Komaki. Formation of Fe-based amorphous coating films by thermal spraying technique / Masahiro Komaki, Tsunehiro Mimura, Yuji Kusumoto, Ryurou Kurahasi, Masahisa Kouzaki, Tohru Yamasaki // Materials Transactions. – 2010. – Vol. 51, № 9. – Pp. 1581-1585.

2. Шпак А.П. Теплофизика формирования аморфных и нанокристаллических газотермических покрытий. Математические модели / А.П. Шпак, Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Н.О. Меранова, Ю.В. Шеренковский, В.Н. Коржик. – К. : Изд-во "Академперіодика", 2005. – 118 с.

3. Калита В.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В.И. Калита, Д.И. Комлев. – М. : Изд. дом "Прадо-М", 2008. – 400 с.

4. Калита В.И. Формирование покрытий с аморфной и наноструктурой / В.И. Калита, В.В. Яркин, В.П. Багмутов и др. // *Металлы* : сб. науч. тр. – 2007. – № 6. – С. 95-101.

5. Куницкий Ю.А. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике / Ю.А. Куницкий, В.Н. Коржик, Ю.С. Борисов. – К. : Изд-во "Техника", 1988. – 198 с.

6. Девис Г.А. Методы быстрой закалки и образование аморфных металлических сплавов / Г.А. Девис // *Быстрозакаленные металлы* : сб. науч. тр. – М. : Изд-во "Металлургия", 1983. – С. 11-30.

7. Bergmann H.W. Calculation of cooling and heating rates and transformation curves for the preparation on metallic glasses / H.W. Bergmann, H.U. Fritsh, G. Hunger // *J. Mater. Sci.* – 1981. – Vol. 16, 17. – Pp. 1935-1944.

### **Меранова Н.О. Спільний аналіз температурних режимів і фазових перетворень у плазмових амортизованих покриттях**

Отримано розв'язок задачі прогнозування об'ємного вмісту аморфної фази в плазмових покриттях на базі дослідження процесів теплопереносу в них і даних термодинамічних діаграм "температура-час-перетворення". Вивчено особливості впливу на процес аморфізації таких факторів, як товщина напилованих часток, рівень їх нагріву і матеріал основи. Представлено дані досліджень, згідно з якими об'ємний вміст аморфної фази підвищується зі зменшенням товщини напилованих часток і збільшенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу основи. Показано також, що в разі зростання початкової температури часток вище від температури плавлення матеріалу покриття умови аморфізації можуть погіршуватися.

**Ключові слова:** процес теплопереносу, плазмові покриття, термодинамічна діаграма "температура-час-перетворення", об'ємний вміст аморфної фази.

### **Meranova N.O. Joint Analysis of the Temperature Regime and Phase Transformations in the Plasma Amorphized Coatings**

The solution of the problem of forecasting the volume content of the amorphous phase in plasma coatings on the basis of the study of heat transfer processes in these coatings and thermo-kinetic diagrams "temperature – time – transformation" is obtained. The features of influence on the process of amorphization of factors such as the thickness of the sprayed particles, the level of heating of these particles and the base material are studied. The data of studies that the volume content of the amorphous phase increases with decreasing thickness of the sprayed particles and increase the thermal conductivity of the base material are presented. It is also shown that increasing the initial temperature of the particles above the melting point of the coating material the conditions of amorphization may deteriorate.

**Keywords:** heat transfer process, plasma coating, thermokinetic diagram "temperature-time- transformation", the volume content of the amorphous phase.

УДК 515.2

*Доц. В.М. Попов, канд. техн. наук;*

*проф. І.А. Чуб, д-р техн. наук – НУ цивільного захисту України*

### **ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВІВ МОЖЛИВОЇ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ЕТАПІ ФОРМУВАННЯ ПРОГРАМИ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ**

Розглянуто заходи програми розвитку системи техногенної безпеки території, яка значною мірою залежить від якості управління інформаційними зв'язками між учасниками програми. Для їх реалізації виникає потреба прогнозування загроз для потенційно небезпечних об'єктів регіону та динаміки зміни їх стану під впливом природних, техно-

генних та інших факторів у рамках підсистеми моніторингу. Показано особливості застосування геоінформаційної системи, інтегрованої до складу системи моніторингу системи техногенної безпеки регіону для прогнозування наслідків аварії з викидом аміаку на АОЗТ "Холодопром" у Харкові.

**Ключові слова:** техногенна безпека регіону, хімічна аварія, прогноз наслідків, ГІС.

**Постановка проблеми.** Економічна, соціально-політична та екологічна ситуація, яка складається на різних територіях України (в областях, містах, районах, на локальних територіях), визначається не тільки специфікою природно-географічних умов, рівнем розвитку продуктивних сил, особливостями виробничої та транспортної інфраструктури, але і характером і масштабами негативного впливу на природне середовище наслідків надзвичайних ситуацій (НС) на потенційно-небезпечних об'єктах (ПНО) промисловості, сільського господарства, житлово-комунального господарства, транспорту тощо. Запобігання негативним наслідкам можливої техногенної аварії можливе тільки на основі реалізації комплексу задач соціально-економічного, науково-технічного розвитку території та охорони навколишнього середовища. Основою множини заходів програми забезпечення техногенної безпеки (ТБ) території є підвищення ефективності територіальної системи техногенної безпеки (ТСТБ) з урахуванням динаміки розвитку системи в контексті збереження прийнятного рівня техногенної безпеки регіону, яке значною мірою залежить від якості управління інформаційними зв'язками між учасниками програми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на значну практичну потребу, на цей час немає єдиного теоретико-методологічного підходу до побудови методів, що забезпечують управління системою техногенної безпеки регіону з урахуванням особливостей території, високої динаміки множини ПНО і зовнішнього середовища, яке генерує система вищого рівня ієрархії.

У роботі [1] проаналізовано основні функції інформаційно-аналітичної підсистеми підтримки управлінських рішень зі забезпечення техногенної безпеки регіону, орієнтованої на врахування динаміки структури і параметрів потенційно небезпечних об'єктів території, зовнішнього середовища системи, а також особливостей території. Визначено складові елементи інформаційно-аналітичної платформи управління програмою розвитку системи техногенної безпеки, призначені для реалізації заданих функцій, що містять підсистему моніторингу, підсистему збереження даних, аналітичну та керівну підсистему. У публікаціях [2, 3] розглянуто питання аналізу та моделювання спеціалізованих систем моніторингу, орієнтованих на підтримку прийняття рішень щодо зниження техногенного ризику для навколишнього середовища і населення. Здебільшого це пов'язано з розробленням і використанням технічних засобів автоматизованого контролю, передачі та опрацювання даних під час організації моніторингу на різних територіях і візуалізації його результатів.

Наразі у структурах наявних систем моніторингу відсутні інформаційні потоки, що забезпечують адаптацію до поточних змін параметрів зовнішнього середовища і ПНО. У роботах [4, 5] досліджено проблеми впровадження у СТБ регіону геоінформаційних технологій для візуалізації та просторового аналізу даних, розроблено підходи до побудови систем підтримки прийняття рішень для локалізації та ліквідації НС з використанням геоінформаційних систем