

Вплив хімічного складу на теплостійкість ливої конструкційної сталі

Є. Г. Афтанділянц, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
afteyev@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-5864-9855

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

У роботі наведено результати дослідження впливу хімічного складу, температури, напруження і часу експлуатації на повзучість і довговічність конструкційних сталей.

Показано, що працездатність конструкційних сталей в умовах підвищених температур і навантажень залежить від хімічного складу, рівня напруження, часу праці та температури. Вплив легуючих елементів пов'язаний з гальмуванням процесу знеміцнення теплостійких сталей в наслідок зниження їх дифузійної рухливості та інтенсивності перерозподілу між феритом і вторинними фазами, їх коагуляції і зниження дефектності структури. Побудовано математичні моделі відносного видовження та часу руйнування у процесі повзучості залежно від умов експлуатації та ступеня легування сталі. Встановлено, що працездатність теплостійких конструкційних сталей, залежить на 61 – 64 % від ступеня легування, 18 – 21 % - величини зовнішнього напруження, 7 – 18 % - температури та 11 % часу експлуатації.

Показано, що коагуляція карбідів і нітридів в сталях легованих азотом і ванадієм повільніша, ніж карбідів в сталях легованих молібденом, що більш ефективно зсуває процес знеміцнення теплостійкої сталі в область більш високих температур і часу.

Ключові слова: *сталь, теплостійкість, хімічний склад, температура, напруження, повзучість, довготривалість.*

Надійність і довговічність конструкційних сталей, виробі з яких працюють за тривалих температуро-силових впливів, визначаються рівнем і стабільністю фізико-механічних властивостей сталей, які залежать від легованості і властивостей твердого розчину, дефектів його кристалічної будови, властивостей, кількості, дисперсності і розподілу первинних і вторинних фаз виділення [1-4].

В умовах експлуатації при підвищених температурах властивості не стабільні, оскільки залежно від температуро-силового впливу розвиваються процеси перерозподілу легуючих елементів між твердим розчином і фазами виділення, їх коагуляції і зміни дефектності кристалічної структури. В результаті знижується час досягнення допустимих деформацій, руйнування і довговічність сталей. Раціональне легування теплостійких сталей дозволяє в певній мірі вирішувати завдання зниження інтенсивності розвитку процесів знеміцнення їх при експлуатації.

Структура і фізико-механічні властивості

Для отримання стабільної структури теплостійких конструкційних сталей їх легують хромом, молібденом, азотом, ванадієм та іншими елементами, а відпуск, в процесі термічного поліпшення, проводять при температурі, яка на 100-150 °С вище температури експлуатації виробів. За цих умов інтенсивність розвитку процесів перерозподілу легуючих елементів між твердим розчином і фазами виділення, їх коагуляції і зміни дефектності кристалічної структури визначається хімічним складом сталі, робочими напруженнями, температурою та тривалістю експлуатації.

Молібден є одним з основних легуючих елементів в конструкційних теплостійких сталях. Механізм підвищення молібденом тривалої міцності пов'язаний зі зміцненням твердого розчину внаслідок зниження дифузійної рухливості атомів і вакансій і швидкості руху дислокацій, а також з виділенням дисперсних карбідів Mo_2C , які гальмують рух дислокацій [5-6].

Ванадій є більш активним, ніж молібден карбидоутворюючим елементом. Виділення дисперсних карбідів VC, більш стійких до коагуляції, ніж Mo_2C призводить до підвищення вкладу дисперсійного зміцнення в теплостійкість сталі. Легування ванадієм підвищує ступінь твердорозчинного і дисперсійного зміцнення сталі [7, 8].

Вплив інших легуючих елементів на теплостійкість сталі досліджено в роботах [1-8]. Однак співвідношення ефективності впливу хімічного складу сталі і умов експлуатації (температура, напруження, час) на повзучість і довговічність виробів вивчено недостатньо.

Тому представляло інтерес дослідити співвідношення ефективності впливу зміни хімічного стану теплостійкої сталі при додатковому легуванні молібденом та ванадієм, а також температури, напруження та часу експлуатації на повзучість і довготривалість виробів.

Досліджувані теплостійкі конструкційні сталі виплавляли в 160 кг індукційної печі з основною футеровкою та розливали в сухі пісчано-глинисті тріфоподібні форми з яких виготовляли зразки діаметром 10 мм і розрахунковою довжиною 50 мм для дослідження повзучості та довготривалості під навантаженням за підвищених температур на пристрої «ATS 2320». Градієнт температур при випробуваннях становив не більше $\pm 0,1$ °С, точність визначення навантаження $< 0,5$ %, а деформації $< 0,2$ мкм. Діаграми повзучості записувалися в режимі реального часу.

Хімічний склад сталей, температури їх гартування та відпуску наведено в таблиці.

Експерименти виконували при температурах (t , °С) від 500 до 600 °С (середнє – 580 °С), напруженнях (σ , МПа) від 65 до 240 МПа (середнє – 100 МПа), а у випадку повзучості час витримки зразків (τ , год) змінювався від 18 до 4390 годин (середнє – 673 год).

Значення відносного видовження зразків (δ , %) у процесі повзучості досліджених сталей складали від 0,3 до 55 % (середнє – 5,5 %), а часу (τ_p , год), при якому відбувалось руйнування - від 22 до 4500 годин (середнє – 1360 год).

Відомо, що при аналізі впливу хімічного складу залізвуглецевих сплавів, на різноманітні властивості, поширено використовують такий

Структура і фізико-механічні властивості

Хімічний склад (мас. частка %), температури гартування ($t_{\text{гарт}}$, °C)
та відпуску ($t_{\text{відп}}$, °C) сталей

№ плавки	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	N	$t_{\text{гарт}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{відп}}, ^\circ\text{C}$
	мас. частка %								
1	0,31	0,32	0,63	1,1	0,2	0	0,006	880	630
2	0,3	0,33	0,65	1	0	0,11	0,018	930	650
3	0,2	0,58	0,57	5,36	0,52	0	0,006	940	700
4	0,23	0,56	0,43	5,44	0	0,14	0,02	1020	700
5	0,22	0,56	0,44	5,37	0	0	0,007	1020	730
6	0,22	0,56	0,44	5,37	0	0,14	0,021	1050	700
7	0,23	0,56	0,43	5,44	0,2	0,14	0,02	1020	700
8	0,21	0,55	0,54	5,27	0	0,13	0,019	950	680

емпіричний параметр, як вуглецевий еквівалент. Еквівалент хімічного складу матеріалу, відносно будь-якого елемента, визначається, як сума добутку маси i -го елемента на відношення атомної маси елемента, відносно якого розраховується хімічний склад, до атомної маси i -го елемента [9].

Вуглецевий еквівалент ($C_{\text{екв}}$, мас. час. %) вищенаведених теплостійких сталей виражається наступним рівнянням:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,429 \cdot Si + 0,218 \cdot Mn + 0,231 \cdot Cr + 0,235 \cdot V + 0,125 \cdot Mo + 0,857 \cdot N \quad (1)$$

Результати регресійного аналізу показали, що вплив хімічного складу теплостійких сталей ($C_{\text{екв}}$, мас. час. %) та таких експлуатаційних факторів, як температура (t , °C), напруження (σ , МПа), витримка (τ , год) на відносне видовження у процесі повзучості (δ , %) та час (τ_p , год), при якому відбувається руйнування, описується наступними рівняннями.

$$\delta = 0,104 \cdot t + 0,105 \cdot \sigma + 0,002 \cdot \tau - 27,6 \cdot C_{\text{екв}} - 3,9 \cdot C_{\text{екв}}^2 + 6,8 \cdot C_{\text{екв}}^3, \quad (2)$$

$$R = 0,838; F_{6/179} = 70,4 > F_{\tau(99\%)} = 1,5.$$

$$\tau_p = 88978 \cdot C_{\text{екв}} - 65387 \cdot C_{\text{екв}}^2 + 15611 \cdot C_{\text{екв}}^3 - 60,1 \cdot t - 29,3 \cdot \sigma \quad (3)$$

$$R = 0,858; F_{5/35} = 19,5 > F_{\tau(99\%)} = 3,5.$$

Аналіз ефективності впливу досліджуваних факторів показав, що процес повзучості теплостійких сталей (δ), в умовах експерименту на 64 % визначається їх хімічним складом, 7 %-температурою, 11 % - часом витримки, 18% напруженим станом. У випадку довготривалої стійкості вклад хімічного складу сталей складає 61 %, температури – 18%, а напруження - 21 %.

З використанням отриманих закономірностей (2 і 3) порівняли ефективність впливу молібдену, ванадію та сумісного впливу ванадію та

Структура і фізико-механічні властивості

азоту на повзучість (рис. 1) після витримки 1000 год при температурі 300 °С та напруженні 100 МПа і довготривалість (рис. 2) теплостійкої сталі при температурі 500 °С та напруженні 65 МПа.

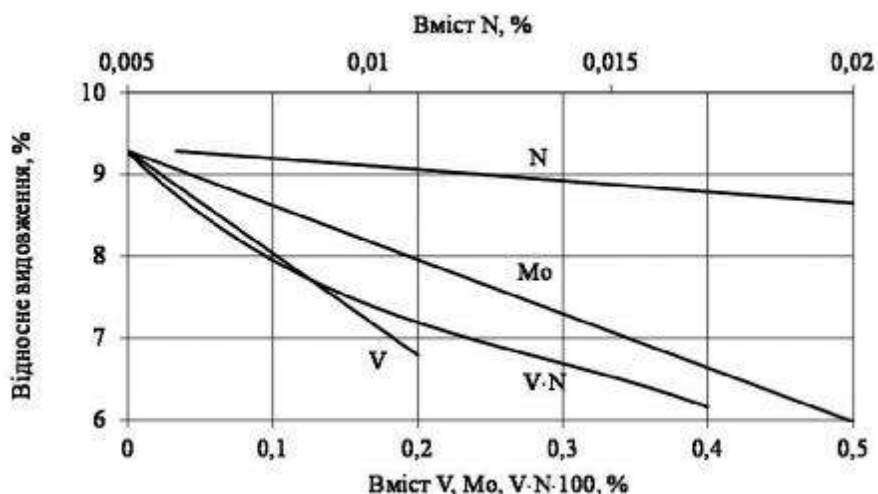


Рис. 1. Вплив хімічного складу на повзучість теплостійкої сталі. Базовий хімічний склад сталі (мас. частка %): C = 0,2; Si = 0,5; Mn = 0,5; Cr = 1,0; N = 0,006.

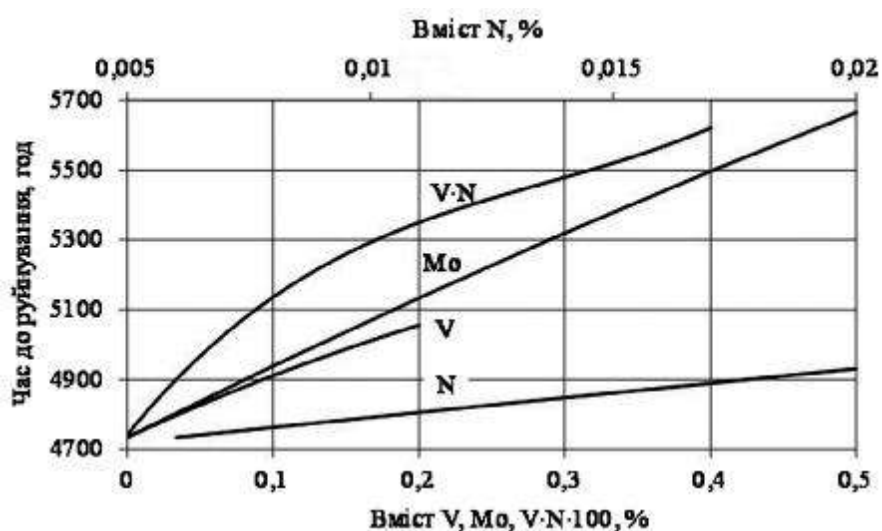


Рис. 2. Вплив хімічного складу на довготривалість теплостійкої сталі.

Результати виконаних досліджень показують, що знеміцнення теплостійкої сталі з азотом і ванадієм в процесі повзучості менше, ніж сталі з молібденом. Леговані молібденом сталі, з меншим опором розвитку деформації (рис. 1) і, як наслідок, мають менший час до руйнування (рис. 2), ніж сталі з азотом і ванадієм.

Металографічно показано, що сумісний вплив азоту і ванадію є більш ефективним, ніж легуванням молібденом, щодо стабілізації вторинної структури (рис. 3, 4). Хімічний склад і режими термічної обробки сталей згідно з таблицею: а – плавка 1; б – 2; в – 3; г – 4. Час до руйнування: а –

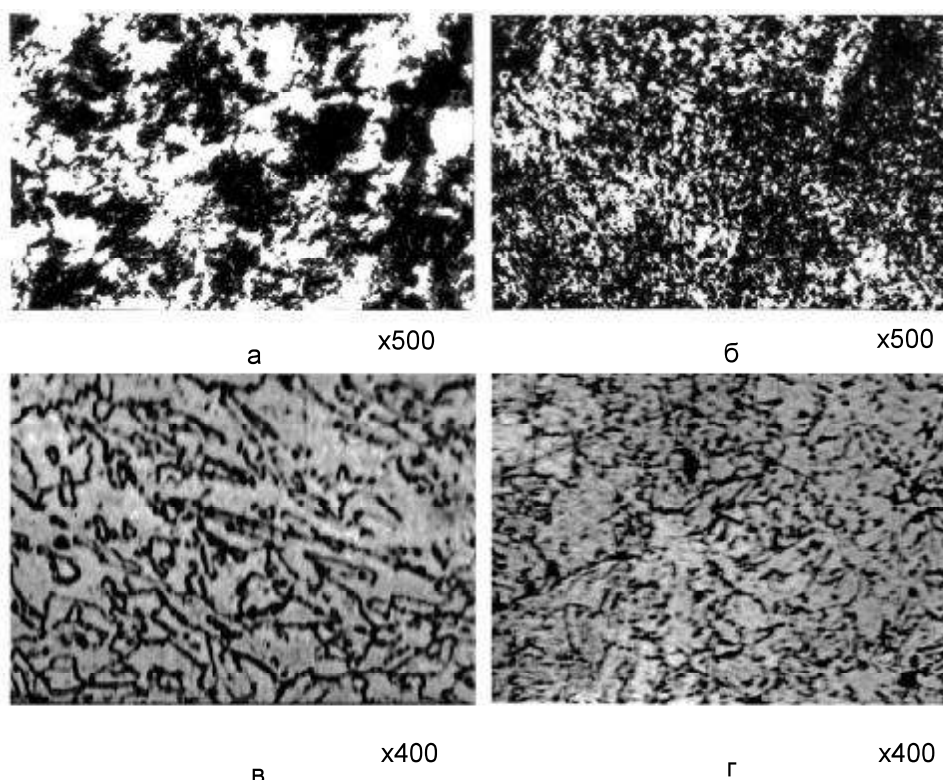


Рис. 3. Мікроструктура теплостійких сталей після випробувань на тривалу міцність при температурі 500 °С (а, б) і 600 °С (в, г) і напруженні 180 МПа (а, б) і 100 МПа.

2383 год; б – 4390 год; в – 317 год; г – 578 год. З рис. 4 видно, що процес коагуляції карбідів і нітридів в сталях з азотом і ванадієм характеризується меншим розвитком порівняно з коагуляцією карбідів в сталях, легуваних молібденом. Після термічного поліпшення сталей при легуванні їх молібденом, спостерігаються карбіди розміром 0,03-0,3 мкм, розподілені в обсязі і по межах зерен. Тривалий нагрів призводить до збільшення розмірів карбідів в матриці і їх кількості по межах зерен (рис. 4 а, в). У ділянках біля меж і на межах зерен відзначається значне збільшення виділень карбідів розміром 0,3-0,5 мкм.

У сталях з азотом і ванадієм зміцнююча фаза розміром від 0,01 до 0,05 мкм розподіляється, в основному, в об'ємі зерна (рис. 4 б). Після випробувань розмір часток збільшується до 0,02-0,07 мкм (рис. 4 г). Час до руйнування: в – 317 год; г – 578 год. Хімічний склад і режими термічної обробки сталей згідно з таблицею: а, в – плавка 3; б; г – 4.

Результати виконаних експериментів показують, що з огляду на більш високу термодинамічну стійкість нітридів і карбонітридів ванадію, порівняно з карбідами, а також карбідів молібдену, легування сталі азотом і ванадієм можна розглядати як ефективний метод підвищення тривалої міцності теплостійкої конструкційної сталі.

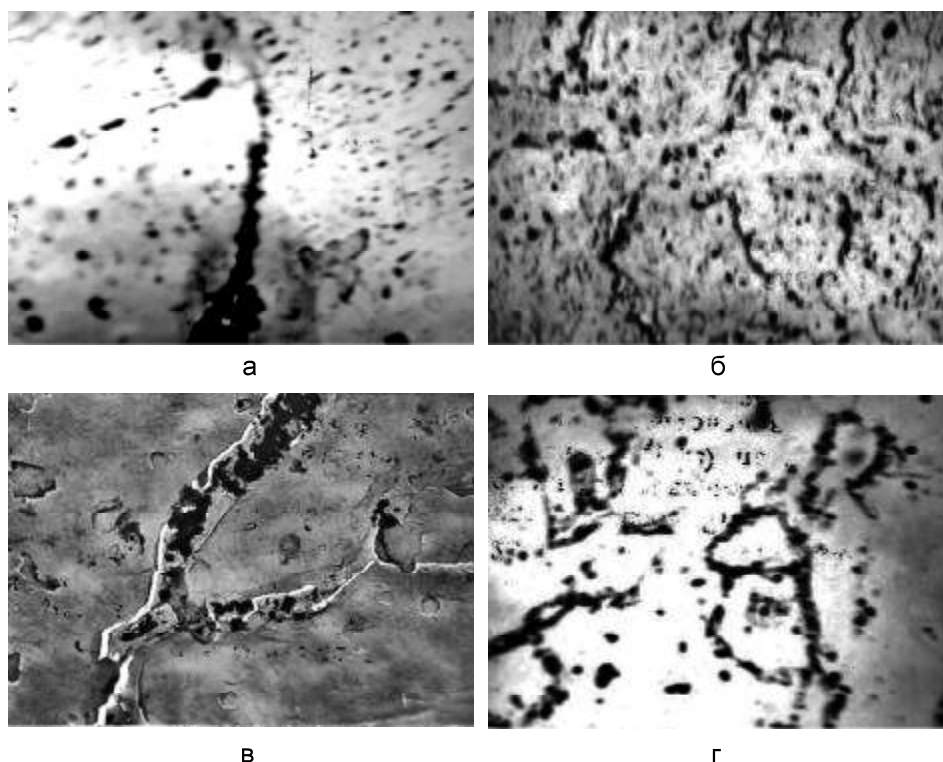


Рис. 4. Розподіл вторинних фаз в теплостійких сталях до (а, б) і після (в, г) випробувань на тривалу міцність при температурі 600 ° С і напруженні 100 МПа. $\times 9000$.

Література

1. Лепин Г.Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. – М.: Металлургия, 1976. – 344 с.
2. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеев С.В. Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 224 с.
3. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
4. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев: Техніка, 1991. – 120 с.
5. Меськин В.С. Основы легирования стали. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.
6. Keller H., Krisch A. Der Einfluss der Carbidausscheidungen auf das Kriechverhalten warmfester Chrom - Molybdan - Stähle // Arch. Eisenhutt. – 1977. – No. 9. – P. 49-53.
7. Foldyna V., Brardil V., Prinka T. Vliv chemického slozeni a mikrostruktury na zarupevuast nizkolegovane oceli 0,5%Cr-0,5%Mo-0,5%V // Huetn. listy. – 1974. – 29, № 7. – P. 487-495.
8. Foldyna V., Iokobova A., Prinka T. Influence of microstructure on creep properties of low-alloy ferritic Cr-Mo-V steels // Creep strengthsteels and high temp. alloys, Proc. Meet., Univ. Sheffield, 1972, London, 1974. – P. 230-236.

9. Химическая энциклопедия: [в 5-и т.]. Гл. ред. И.Л. Кнунянц. – М.: Сов. энцикл., 1990. – Т. 5.– 783 с.
10. Шведков Е.Л. Элементарная математическая статистика в экспериментальных задачах материаловедения. – Киев: Наукова думка, 1975. – 111 с.

References

1. Lepin G.F. *Polzuchest metallov i kriterii zharoprochnosti*. (Metal creep of and heat resistance criteria), Moscow: Metallurgija, 1976, 344 p. [in Russian].
2. Kumanin V.I., Kovaleva L.A., Alekseev S.V. *Dolgovechnost metalla v uslovijah polzuchesti* (The durability of the metal under creep), Moscow: Metallurgija, 1988, 224 p. [in Russian].
3. Antikajin P.A. *Metally i raschet na prochnost' kotlov i truboprovodov* (Metals and strength analysis of boilers and pipelines), Moscow: Jenergoatomizdat, 1990, 368p. [in Russian].
4. Berezina T.G., Bugaj N.V., Trunin I.I. *Diagnostirovanie i prognozirovanie dolgovechnosti metalla teplojenergeticheskikh ustanovok* (Diagnostics and prediction of the durability of metal heat power plants), Kiev: Tehnika, 1991, 120 p. [in Russian].
5. Meskin V.C. *Osnovy legirovaniya stali* (Basics of alloying steel), Moscow: Metallurgija, 1964, 684 p. [in Russian].
6. Keller H., Krisch A., *Arch. Eisenhutt.*, 1977, No. 9, pp. 49-53 [in Germany].
7. Foldyna V., Brardil V., Prinka T., *Huetn. listy.*, 1974, 29, No. 7, pp. 487-495 [in Poland].
8. Foldyna V., Iokobova A., Prinka T. *Influence of microstructure on creep properties of low-alloy ferritic Cr-Mo-V steels* (Proc. Meet. Univ. Sheffield "Creep strength steels and high temp. alloys"), London, 1974, pp. 230-236 [in English].
9. Knunyants, I.L. (Ed.). *Khimicheskaya entsiklopediya* (Chemical Encyclopedia), Moscow: Sov. Entsikl, 1990, Vol. 5, 783 p. [in Russian].
10. Shvedkov E.L. *Jelementarnaja matematicheskaja statistika v jeksperimental'nyh zadachah materialovedenija* (Elementary mathematical statistics in experimental problems of materials science), Kyiv: Naukova dumka, 1975, 111 p. [in Russian].

Одержано 28.12.20

Y. G. Aftandilants

The influence of chemical composition on the heat resistance of casted structural steel

Summary

The paper presents the results of the study of the influence of chemical composition, temperature, stress and operating time on the creep and durability of structural steels.

It is shown that the efficiency of structural steels in conditions of elevated temperatures and loads depends on the chemical composition, stress level, operating time and temperature. The influence of alloying elements is associated with the inhibition of the process of weakening of heat-resistant steels due to the reduction of their diffusion

Структура і фізико-механічні властивості

mobility and intensity of redistribution between the ferrite and secondary phases, their coagulation and reduction of structural defects.

Mathematical models of relative elongation and fracture time in the process of creep from operating conditions and degree of alloying of steel are constructed.

It is established that the efficiency of heat-resistant structural steels depends on 61 - 64% of the degree of alloying, 18- 21% - the value of external stress, 7 - 18% - temperature and 11% of operating time.

It is shown that the coagulation of carbides and nitrides in steels doped with nitrogen and vanadium is slower than carbides in steels doped with molybdenum, which more effectively shifts the softening process of heat-resistant steel in the region of higher temperatures and time.

Keywords: steel, heat resistance, chemical composition, temperature, stress, creep, durability.

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.
Ціна архівних номерів 1995 – 2019 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.