

## *Теплофізичний стан вуглецевих сталей та його вплив на формування теплового бар'єру при локальній термічній дії*

О. М. Савицький, кандидат технічних наук

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

*Встановлено, що при локальному термічному впливові на метал при зварюванні навколо рідкої ванни формується аустенітна зона з мінімальною теплопровідністю і максимальною теплоємністю, яка відіграє роль «теплового бар'єру», перешкоджаючи тепловідводу тепла із ванни, а також сприяє накопичуванню і утримуванию значної кількості тепла. Показано, що при нагріванні це сприяє утворенню зварного з'єднання, а на стадії охолодження призводить до крихкості металу, утворення гарячих і холодних тріщин в ньому. Розміри зазначеної зони збільшуються зі збільшенням тепловкладення в метал. Для зменшення негативного впливу теплового бар'єру необхідно знижувати енергоємність технологічних процесів і підвищувати концентрацію нагрівання.*

**В**углецеві сталі є одним з основних конструкційних матеріалів сьогодення. Це обумовлено відносною дешевизною і сучасним рівнем досконалості методів отримання вуглецевих сталей та технологічних процесів створення конструкцій на їх основі.

Сталі, що мають у своєму складі 0,1 % вуглецю, вже проявляють чутливість до термічного впливу, яка посилюється зі зростанням вмісту вуглецю і легуючих елементів, що є позитивним фактором через можливість коригування термічною обробкою їх структури, механічних властивостей та експлуатаційних характеристик. Однак існує ряд технологічних процесів, заснованих на локальному термічному впливові, таких як зварювання, місцева плазмова і дугова обробка, при яких термічна чутливість може призвести до небажаних наслідків. Тому розроблено ряд методів їх зварювання, які з урахуванням особливостей хімічного складу і чутливості до умов нагріву і охолодження, забезпечують отримання якісних зварних з'єднань. Але ці методи, як правило збільшують трудоемність і вартість зварювального виробництва [1 – 3].

Сучасний підхід до оцінки зварюваності вуглецевих сталей враховує їх хімічний склад і практично не зважає на теплофізичний стан сталей. Зварюваність сталей характеризується комплексом показників, основними з яких вважаються стійкість зварних з'єднань проти утворення гарячих і холодних тріщин, а також проти перегріву і крихкого руйнування, та їх здатність набувати у процесі технологічної переробки необхідних механічних властивостей [1 – 3]. Результати останніх досліджень свідчать, що зварюваність сталей безпосередньо залежить від їх теплофізичних показників

## Фазові перетворення

і поступово погіршується в міру зменшення теплопровідності і підвищення теплоємності.

Враховуючи, що основою вуглецевих сталей є залізо, аналіз особливостей зміни теплофізичних властивостей від температури нагрівання доцільно розпочати з нього. На рис. 1. наведено залежність коефіцієнта теплопровідності заліза і його теплоємності від температури [4].

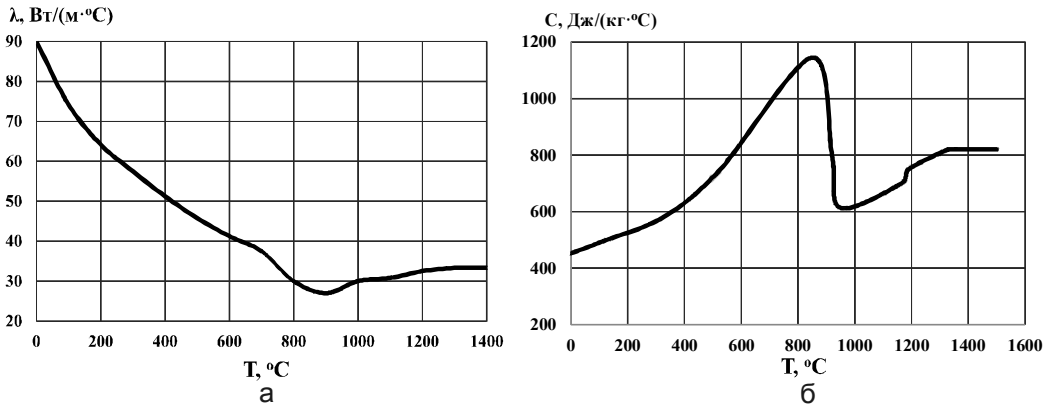


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності (а) і теплоємності (б) заліза від температури.

Крива залежності коефіцієнта теплопровідності заліза від температури нагрівання (рис. 1 а) свідчить, що теплопровідність зменшується у 3 рази і досягає свого мінімуму 27 – 28 Вт/(м · °С) при нагріві до температури аустенітного ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) перетворення. Подальше зростання температури супроводжується незначним підвищенням і стабілізацією  $\lambda$  на рівні 32 – 34 Вт/(м · °С) аж до температури плавлення заліза.

Теплоємність заліза (рис. 1 б) поступово зростає при нагріванні, досягаючи свого максимуму 1130 – 1140 Дж/(кг · °С) при температурі аустенітизації ( $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення). При подальшому нагріванні знижується в 2 рази, потім зростає і стабілізується на 820 Дж/(кг · °С).

Таким чином при температурах аустенітизації залізо характеризується мінімальною теплопровідністю і максимальною теплоємністю.

Аналогічно впливає нагрівання і на теплопровідність більшості вуглецевих сталей з тією лише різницею, що в залізі відсутні домішки, а сталі їх містять у досить великих кількостях як

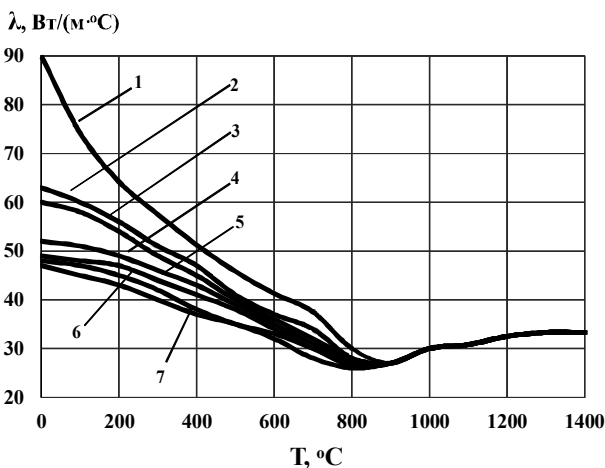


Рис. 2. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури і вмісту вуглецю. 1 – чисте залізо, 2 – 0,08 % С, 3 – 0,10 % С, 4 – 0,25 % С, 5 – 0,50 % С, 6 – 0,80 % С, 7 – 1,20 % С.

## Фазові перетворення

легуючі елементи, основним з яких є вуглець. Дані, наведені на рис. 2, свідчать, що з підвищенням вмісту вуглецю теплопровідність металу погіршується. При наявності в сталі 1,2 % С її теплопровідність майже в 2 рази нижча, ніж у заліза. Теплопровідність кожної сталі в межах одного хімічного складу також зменшується у міру нагрівання металу. При нагріванні до температур, близьких до 700 – 900 °С, вплив вуглецю на теплопровідність сталей поступово послаблюється до повного зникнення, а  $\lambda$  знижується приблизно до теплопровідності чистого заліза при аналогічних температурах (26 – 28 Вт/(м · °С)).

Температури критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  розглянутих сталей (табл. 1) свідчать, що аустенітні перетворення в них охоплюють температурний інтервал 700 – 900 °С [5]. В ньому теплопровідність вуглецевих сталей досягає мінімуму і співпадає з теплопровідністю чистого заліза, яке набуває аустенітної структури при температурі 911 °С. Тобто в міру підвищення температури металу різниця між теплопровідністю заліза і сталей, незалежно від вмісту вуглецю в них, поступово зменшується і зникає практично повністю при досягненні температури  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення, після чого теплопровідності сталей і заліза визначаються теплопровідністю аустеніту, в якому розчиняються усі домішки і тому вони приблизно рівні.

Таблиця 1

Температури критичних точок аустенітного перетворення для деяких вуглецевих сталей

Номер кривої (рис. 2)	1	2	3	4	5	6	7
C, %	Fe	0,08	0,1	0,25	0,5	0,8	1,2
$A_{c1}$ , °С	911	735	732	735	725	730	730
$A_{c3}$ , °С	911	874	870	835	760	765	820

Легування сталей призводить до подальшого інтенсивного зниження їх теплопровідності (рис. 3). Причому за інтенсивністю впливу на теплопровідність кремній і марганець перевершують усі інші елементи. Але незважаючи на певні відмінності в ступені впливу легуючих елементів на теплопровідність сталей, при підвищенні температури нагрівання його інтенсивність поступово послаблюється. Теплопровідності легованих сталей поступово наближаються до теплопровідності чистого заліза, і досягають її мінімальних значень після аустенітизації (табл. 2).

Таким чином, підвищення температури нагрівання поступово послаблює вплив вуглецю і легуючих елементів на теплопровідність сталі, зводячи його до мінімуму при нагріванні до температур, коли і сталі і залізо набувають аустенітної структури, а домішки, що містяться в сталях, розчиняються в  $\gamma$ -залізі.

Вплив температури нагрівання на теплоємність вуглецевих нелегованих і легованих сталей [5 – 7] подібний до впливу на залізо. При нагріванні до температур аустенітизації теплоємність досягає свого максимального значення.

## Фазові перетворення

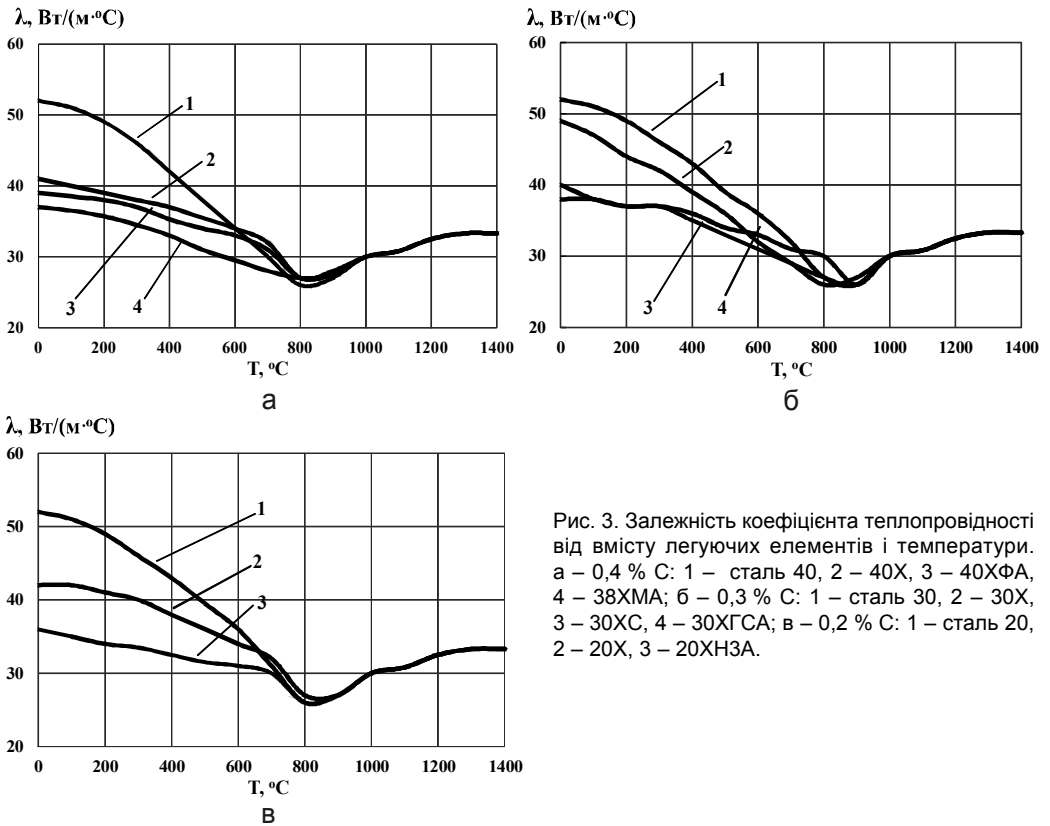


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопровідності від вмісту легуючих елементів і температури. а – 0,4 % С: 1 – сталь 40, 2 – 40Х, 3 – 40ХФА, 4 – 38ХМА; б – 0,3 % С: 1 – сталь 30, 2 – 30Х, 3 – 30ХС, 4 – 30ХГСА; в – 0,2 % С: 1 – сталь 20, 2 – 20Х, 3 – 20ХН3А.

Таблиця 2

Температури критичних точок аустенітного перетворення для деяких легованих вуглецевих сталей

Рисунок	Крива	Марка сталі	$A_{c1}, ^\circ C$	$A_{c3}, ^\circ C$
3 а	1	Сталь 40	730	790
	2	40Х	743	815
	3	40ХФА	760	800
	4	38ХМА	758	805
3 б	1	Сталь 30	730	820
	2	30Х	740	815
	3	33ХС	855	830
	4	30ХГСА	760	830
3 в	1	Сталь 20	735	850
	2	20Х	750	825
	3	20ХН3Ф	730	810

Таким чином, після завершення аустенізації теплофізичний стан вуглецевих нелегованих і легованих сталей характеризується мінімальною теплопровідністю і максимальною теплоємністю. Отже, нагрітий до зазначених температур метал є «бар'єром» на шляху поширення тепла від

## Фазові перетворення

більш нагрітого до менш нагрітого, тобто його можна розглядати як тепловий бар'єр.

При традиційній термообробці це немає великого значення, а при місцевій плазмовій чи дугової обробці і, особливо при зварюванні, які засновані на локальному термічному впливові на метал, може призвести до негативних наслідків.

В зварному з'єднанні роль теплового бар'єру відіграє ділянка металу, вихідна структура якого зазнає аустенітизації. Такою ділянкою є ділянка перегріву зони термічного впливу, яка безпосередньо оточує рідку зварювальну ванну і перешкоджає відведенню тепла з неї в основний метал.

На стадії нагрівання тепловий бар'єр відіграє також і позитивну роль у формуванні зварного з'єднання. Якби він не утворювався, то для отримання з'єднання через постійний відвід тепла із зони нагрівання необхідно було б нагрівати до плавлення весь метал, а це ставить під сумнів реалізацію сучасного зварювання з локальним розплавленням металу. На стадії охолодження усе змінюється – тепловий бар'єр перешкоджає відводу тепла зі зварювальної ванни в твердий метал. Це супроводжується збільшенням тривалості перебування ванни в температурному інтервалі кристалізації [8] та підвищує вірогідність утворення гарячих тріщин в металі шва (рис. 4 а).

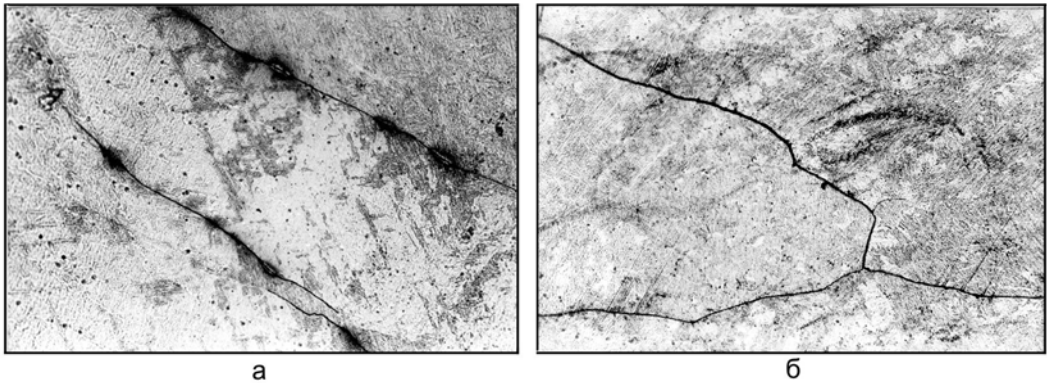


Рис. 4. Тріщини в металі зварного з'єднання. а – гарячі (x120), б – холодні. x240.

Тепловий бар'єр завдяки поєднанню мінімальної теплопровідності і максимальної теплоємності здатен накопичувати значну кількість тепла і утримувати його тривалий час.

На рис. 5 наведено криву термічного циклу, на якій зафіксовано початок ( $A_{c1} = 870\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і кінець ( $A_{c3} = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) аустенітного перетворення, а також початок ( $H_{п.а.} \approx 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і кінець ( $K_{п.а.} \approx 225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) перетворення (розпаду) переохолодженого аустеніту. Видно, що аустенітизація представляє собою ендотермічний процес, при якому поглинання тепла відбувається настільки інтенсивно, що супроводжується зменшенням швидкості нагріву металу (перегин на стадії нагріву термічного циклу). Тривалість аустенітизації складає 0,3 с. Середня швидкість нагрівання металу до  $A_{c1}$  складає  $580\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а в температурному інтервалі аустенітизації вона зменшується до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , майже в двічі.

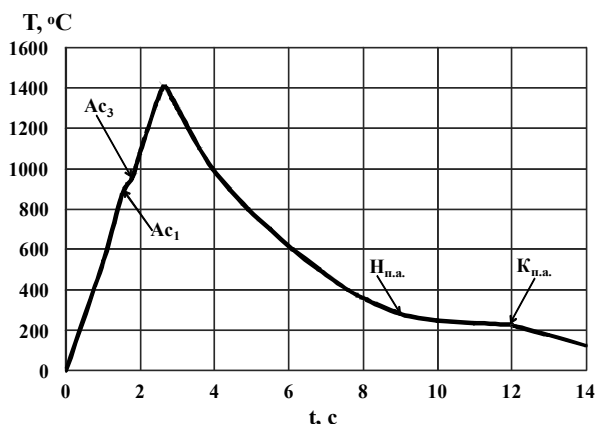


Рис. 5. Термічний цикл.

Розпад аустеніту на стадії охолодження носить екзотермічний характер і протікає із виділенням тепла, про що свідчить уповільнення охолодження в температурному інтервалі  $\sim 280 - 225$  °С. Тривалість розпаду досягає 3 с, тобто в 10 разів довше, ніж аустенітизація. Від закінчення аустенітизації до початку розпаду аустеніту проходить 7,2 с, а до його кінця – 10,2 с. Тривале

існування теплового бар'єру призводить до перегріву металу, збільшення розмірів зерен і, як наслідок, підвищення крихкості зварних з'єднань. Крім цього підвищується рівень гомогенності аустеніту і його стійкість при охолодженні. В результаті зростає схильність металу до гартування на повітрі і до утворення холодних тріщин [1 – 3] (рис. 4 б).

Негативний вплив теплового бар'єру на зварюваність вуглецевих сталей посилюється в міру збільшення його інтенсивності та тривалості існування.

Таким чином результати досліджень свідчать про те, що тепловий бар'єр в зварних з'єднаннях явище фізичне і об'єктивне. На сучасному етапі технічного розвитку його утворенню запобігти неможливо. Крім цього на стадії нагрівання він відіграє і позитивну роль. Тому необхідні методи, які дозволять обмежити і зменшити його негативний вплив на формування зварних з'єднань.

Розміри та тривалість існування теплового бар'єру залежать від тепловкладення в метал при зварюванні і зростають в міру його збільшення. Тепловкладення визначається погонною енергією, що представляє собою відношення теплової потужності джерела нагрівання  $q$  до швидкості його переміщення  $V$ , тобто  $q/V$ . А тому для зменшення негативного впливу теплового бар'єру на формування зварних з'єднань необхідно зменшувати погонну енергію зварювання, тобто орієнтуватись на зварювальні процеси з низькою енергоємністю і високою концентрацією нагрівання такі як дугове зварювання в захисних газах з активуючими флюсами [10 – 14], лазерні і гібридні технології та інші, що забезпечують якісне формування зварних з'єднань при мінімальних тепловкладеннях в метал.

## Література

1. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Патон Б.Е. Технология электрической сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

3. Макара А.М. Сварка высокопрочных сталей. – Киев: Техніка, 1971. – 140 с.
4. Зиновьев Б.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
6. Марочник стали для машиностроения. – М.: Науч. исслед. ин-т информации по машиностроению, 1965. – 594 с.
7. Марочник стали для машиностроения. – М.: Науч. исслед. ин-т информации по машиностроению, 1968. – 600 с.
8. Стеренбоген Ю.А. Влияние температурного интервала кристаллизации на склонность сталей к образованию кристаллизационных трещин при сварке. // Автоматическая сварка. – 1979. – № 7. – С. 10 – 13.
9. Патон Б.Е. Сварка активированным плавящимся электродом в защитном газе // Автоматическая сварка. – 1979. – № 1. – С. 1 – 7.
10. Савицкий М.М. Применение активирующего флюса при сварке неповоротных стыков трубопроводов на монтаже атомных электростанций // Автоматическая сварка. – 1981. – № 11. – С. 71 – 72.
11. Паршин С.Г. Применение активирующих материалов при аргонодуговой сварке // Сварочное производство. – 2003. – № 6. – С. 40 – 43.
12. Savitskij M.M. Mig welding technology using activating // Zavarivaje i zavarene konstrukcije. – 2004. – № 1. – С. 10 – 14.
13. Niagaj J. The influence of activation on technological and ecological properties of welding arc under argon shield during welding of low- and high alloy steels // Biuletyn instytutu spawalnictwa gliwicach. – 2008. – № 1. – P. 46 – 50.
14. Savitskij A.M., Bajic D., Savitskij M.M. Orbital welding technology of pipeline application of activation flux // Zavarivaje i zavarene konstrukcije. – 2010. – № 3. – С. 83 – 90.
15. Савицкий А.М., Савицкий М.М., Шкрабалюк Ю.Н. Особенности повышения производительности сварки плавящимся электродом в защитных газах за счет активации дуги // Проблемы машиностроения. – 2014. – 17, № 2. – С. 62 – 67.

Одержано 06.07.15

**А. М. Савицкий**

### **Теплофизическое состояние углеродистых сталей и его влияние на формирование теплового барьера при локальном термическом воздействии**

#### **Резюме**

Установлено, что при локальном термическом воздействии на металл при сварке вокруг жидкой ванны формируется аустенитная зона с минимальной теплопроводностью и максимальной теплоемкостью. Она играет роль «теплового барьера», препятствуя теплоотводу тепла из ванны, а также способствует накоплению и удерживанию значительного количества тепла. Показано, что при нагреве это способствует образованию сварного соединения, а при охлаждении приводит к охрупчиванию металла, образованию горячих и холодных трещин в нем. Размеры указанной зоны увеличиваются с увеличением тепловложения в металл. Для уменьшения ее негативного влияния необходимо снижать энергоемкость технологических процессов и повышать концентрацию нагрева.

O. M. Savytsky

**Thermal and physical of condition carbon steel and its effect  
on the formation of a thermal barrier at a local thermal effect**

**Summary**

It was found that the local thermal effects on metal (of welding) around the liquid bath forms austenitic zone with minimum thermal conductivity and heat maximum capacity. It plays the role of a “thermal barrier” preventing heat dissipation from the bath, and it is also able to accumulate and retain significant amounts of heat. It is shown that when heated it promotes the formation of a welded joint, while cooling leads to embrittlement of the metal, the formation of hot and cold cracks in there. The dimensions of the zone increases with the heat input into the metal. Therefore, to reduce the negative impact of thermal barrier it necessary to reduce the energy intensity of the production processes and increase the concentration of heat.

***Шановні колеги!***

**Тривас передплата на науково-технічний журнал  
«Металознавство та обробка металів» на 2016 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Вартість одного номера журналу – 40 грн., передплата на рік – 160 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2014 рр. – 10 грн.

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

*банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.*

*Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,*

*з посиланням на журнал “ММ”.*

Копію документа передплати та відомості про передплатника

**просимо надсилати до редакції,  
вказавши номер і дату платіжного документа.**