

Тепловий стан і властивості сталевого зливка за умов ендогенної вібраційної обробки розплаву при кристалізації

В. М. Щеглов, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

М. І. Тарасевич, доктор технічних наук, заступник директора, NIT@ptima.kiev.ua

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу,
stkondrat@gmail.com

В. І. Вейс, аспірант, nikusik123@yandex.ru

Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
zhanna.mom@ptima.kiev.ua

О. О. Токарева, головний математик, olgatokareva@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

У зв'язку з необхідністю зменшення негативного впливу основних дефектів ковальських зливок досліджено зміни їх теплового стану зумовлені ендогенною вібраційною обробкою розплаву під час кристалізації. Вібраційна обробка зливка сталі 40ХН масою 7,6 т здійснювалась у піднадливній частині протягом 13 хв по завершенню розливки сталі при частоті 50 Гц і амплітуді 1,5 мм. За результатами вимірювань температури бічних поверхонь у піднадливній, середній і донній частинах дослідного та контрольного зливок одержані рівняння регресії щодо зміни їх температури протягом 200 хв. Встановлено закономірне підвищення температури за умов ендогенної віброобробки до 30 °С у верхній частині зливка з поступовим зниженням її протягом 100 хв, а у середній частині підвищення на 10-15 °С протягом 50 хв. У донній частині протягом перших 25 хв відмінностей температури не відзначено. В наступних часових інтервалах температура дослідного зливка стабільно знижується на 35-50 °С порівняно з контрольним. Одержані результати свідчать про підвищення температури у верхній (піднадливній) частині експериментального зливка внаслідок ендогенної вібраційної обробки тверднучого розплаву і про закономірний перерозподіл температурних полів по висоті зливка. Збільшення градієнта температур у вказаних об'ємах зливка в результаті ендогенної віброобробки зумовлює підвищення конвекції і перемішування розплаву, просування фронту кристалізації переважно в напрямі надливу, формування дрібнокристалічної структури і більшої протяжності донного конусу без забруднення його неметалевими вкрапленнями, зменшення проявів осьової ліквіації і підвищення механічних властивостей металу зливка. Застосування ендогенної вібраційної обробки сталевих зливок під час їх кристалізації є перспективним технологічним рішенням, що відкриває нові можливості керування процесами кристалізації і структуроутворення, забезпечує підвищення якості властивостей металу великих ковальських зливок.

Ключові слова: зливки, сталь, вібраційна обробка, кристалізація, температура, властивості.

До проблемних питань щодо підвищення якості великих ковальських зливків відносять дефекти, які важко усуваються. Серед них А-подібна зональна, V-подібна осьова сегрегації, а також донний конус від'ємної ліквациї, в якому зосереджена значна кількість великих неметалевих вкраплень. Розвиток пов'язаної з цим хімічної і структурної неоднорідності за висотою та перерізом ковальських зливків призводить до нестабільності механічних властивостей металопродукції.

Для зменшення негативного впливу вказаних дефектів зливків та їх часткового усунення використовують різні технологічні засоби зовнішнього впливу на розплав під час кристалізації – електромагнітне перемішування, продувку інертним газом, обробку ультразвуком, вібраційну обробку тощо [1-3]. Щодо останньої, то вібраційні методи обробки розплаву, що кристалізується, набули досить широкого застосування для покращення властивостей і підвищення якості сталевих виливків. Проте для великих мас металу ковальських зливків (понад 100 т) використання цієї технології за класичною схемою зовнішнього вібраційного впливу при обробці металу у виливниці є дуже складним технологічним процесом пов'язаним також з енергетичними і фінансовими витратами.

Виходячи з цього для ковальських зливків значної маси перспективним може бути введення низькочастотних коливань безпосередньо у розплав зливка, що кристалізується, за допомогою, зануреного у надливну частину зливка, активатора вібрації з вогнетривкого матеріалу. Нашими попередніми дослідженнями [4-6] впливу ендогенної вібраційної обробки (ЕВО) показано доцільність такої технологічної схеми.

З огляду на це досліджено на зливках сталі 40ХН ($T_L = 1491^\circ\text{C}$, $T_S = 1411^\circ\text{C}$) масою 7,6 т вплив ендогенної вібраційної обробки тверднучого розплаву на зміну теплового стану (температур бічної поверхні) експериментального (з віброобробкою) і контрольного (без віброобробки) ковальського зливка (рис. 1).

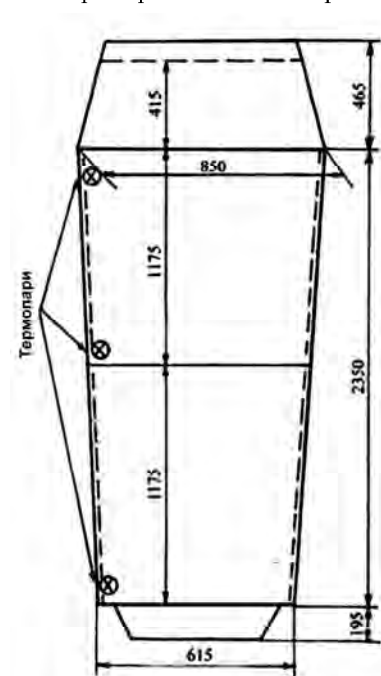


Рис. 1. Розмірні параметри зливків сталі 40ХН і схема розміщення термопар.

Ендогенна вібраційна обробка здійснювалась з використанням віброактиватора у піднадливній частині зливка (через 1,5 хв після закінчення заливки розплаву у виливницю при температурі в ковші 1550°C) протягом 13 хв при частоті 50 Гц і амплітуді 1,5 мм.

Експериментальні значення зміни температури дослідного і контрольного зливків на трьох рівнях - у піднадливній, середній і донній частинах наведено на рис. 2 і в таблиці.

За результатами математичної обробки показань зміни температури відповідних точок бічної поверхні досліджуваного зливка одержано залежності у вигляді поліномів 4-го порядку, які дозволяють розрахувати температури заданих точок бічної поверхні під час його кристалізації протягом 200 хвилин.

За умов звичайного режиму тверднення (контрольний зливок) зміну температури (T , $^\circ\text{C}$) у часі (τ , хв) описують рівняння:

$$T_1 = 1286,47 - 4,90884\tau + 0,0508025\tau^2 - 0,00027709\tau^3 + 0,00000558621\tau^4;$$

$$R = 0,9819$$

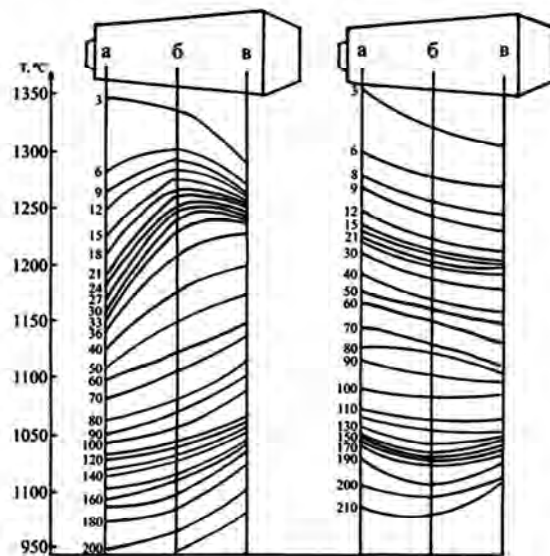


Рис. 2. Ізохрони температур бічної поверхні у донній (а), середній (б) і піднадливній (в) частинах дослідних зливоків у процесі тверднення. Цифри біля кривих – час від закінчення заливки розплаву, хв.

- для середньої частини зливка

$$T_2 = 1294,89 - 4,89869 \cdot \tau + 0,534115 \cdot \tau^2 - 0,000319845 \cdot \tau^3 + 0,00000068390 \cdot \tau^4;$$

$$R = 0,9783$$

- для донної частини зливка

$$T_3 = 1322,26 - 0,87755 \cdot \tau + 0,0498972 \cdot \tau^2 - 0,000266956 \cdot \tau^3 + 0,000000519645 \cdot \tau^4;$$

$$R = 0,9759$$

За умов ендогенної вібраційної обробки зливка зміну температурних показників у часі під час його тверднення описують наступні рівняння:

- для верхньої частини зливка

$$T_4 = 1284,12 - 1,02152 \cdot \tau - 0,34748 \cdot \tau^2 + 0,000330617 \cdot \tau^3 - 0,000000832481 \cdot \tau^4;$$

$$R = 0,9965$$

- для середньої частини зливка

$$T_5 = 1336,24 - 3,93184 \cdot \tau + 0,00200179 \cdot \tau^2 + 0,000141926 \cdot \tau^3 - 0,000000504361 \cdot \tau^4;$$

$$R = 0,9952$$

- для донної частини зливка

$$T_6 = 1341,24 - 8,60474 \cdot \tau + 0,101573 \cdot \tau^2 - 0,000556382 \cdot \tau^3 + 0,000000107713 \cdot \tau^4;$$

$$R = 0,9938$$

Графічні інтерпретації встановлених залежностей представлені на рис.3. Встановлено, що ендогенна вібраційна обробка розплаву тверднучого зливка зумовлює підвищення температури поверхні зливка у піднадливній зоні на 25-30 °С з поступовим її зниженням протягом 100 хв (рис. 3, а). В наступний період часу від 100 до 200 хв температура бічної поверхні на цьому рівні експериментального і контрольного зливоків практично не відрізняються.

У середній за висотою частині досліджуваних зливоків підвищення температури на 10-15 °С в результаті ендогенної вібраційної обробки тверднучого розплаву спостерігається протягом 50 хв. Після цього вона закономірно знижується і стає меншою від температури бічної поверхні контрольного зливка (рис. 3 б).

У донній частині досліджуваних зливоків не спостерігається суттєвих відмінностей температур бічних поверхонь експериментальних і контрольних зливоків

Плавлення і кристалізація

Зміни температури бічних поверхонь дослідних зливків сталі 40ХН у різних за висотою перерізах

Час від кінця заливки, хв	Температура, °С		
	Піднадливна частина	Середня частина	Донна частина
3	1305/1290	1321/1335	1355/1347
6	1271/1273	1277/1302	1300/1282
9	1231/1268	1244/1292	1270/1264
12	1213/1261	1223/1283	1248/1248
15	1206/1256	1213/1273	1233/1226
18	1203/1253	1208/1265	1228/1209
21	1199/1249	1203/1260	1222/1195
24	1193/1244	1197/1252	1218/1183
27	1187/1242	1193/1245	1214/1171
30	1182/1240	1190/1241	1210/1160
33	1173/1238	1183/1226	1206/1151
36	1166/1225	1176/1207	1200/1141
40	1160/1199	1170/1175	1194/1124
50	1148/1174	1160/1148	1177/1107
60	1132/1148	1149/1120	1165/1097
70	1112/1137	1128/1106	1144/1083
80	1104/1113	1122/1081	1125/1065
90	1097/1099	1103/1070	1115/1052
100	1083/1088	1084/1057	1091/1043
110	1062/1065	1063/1045	1074/1033
120	1052/1058	1053/1038	1065/1028
Примітка: над рискою – зливков з вібраційною обробкою; під рискою – контрольний зливков.			

протягом 25 хв від початку тверднення. У наступному часовому інтервалі 25-200 хв температура віброобробленого зливка поступово знижується на 35-50 °С порівняно з контрольним зливком (рис. 3).

Одержані результати свідчать про підвищення температури у верхній (піднадливній) частині експериментального зливка внаслідок ендогенної вібраційної обробки тверднучого розплаву і про закономірний перерозподіл температурних полів по висоті зливка. Збільшення градієнта температур між верхніми і нижніми об'ємами металу зливка і збереження його у часі до 120 хв в межах 30-12 °С зумовлює суттєве підвищення проявів конвекції. Це сприяє більш активному перемішуванню тверднучого розплаву, подрібненню литої структури (рис. 4) і просуванню фронту кристалізації переважно у напрямі надливу та формування дрібнокристалічного донного конусу більшої протяжності за практичної відсутності забруднення його неметалевими вкрапленнями.

Крім того у зливку, підданому ендогенному вібраційному обробленню, спостерігається також зменшення глибини розташування і об'ємів дефектів усадки (рис. 5), звуження зони осрової ліквідації, подрібнення зерна і підвищення значень механічних властивостей металу (рис. 6) – порога міцності (σ_B) на 10 %, порога

Плавлення і кристалізація

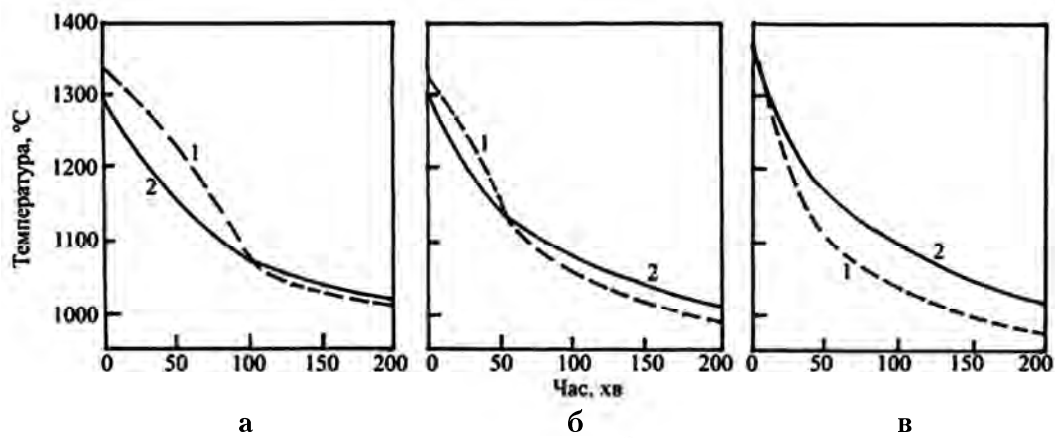


Рис. 3. Графічні інтерпретації математичних моделей зміни термкінетичних параметрів тверднення зливків сталі 40ХН за умов вібраційної обробки (криві 1) і без неї (криві 2). а – підналивна зона, б – середня, в – донна.

текучості (σ_T) на 15 %, відносного видовження (δ) на 30 %, відносного звуження (ψ) на 15 %.

Виходячи з викладеного, застосування ендогенної вібраційної обробки сталевих зливків під час їх кристалізації є перспективним технологічним рішенням, що відкриває нові можливості керування процесами кристалізації і структуроутворення, забезпечує підвищення якості властивостей металу великих ковальських зливків.

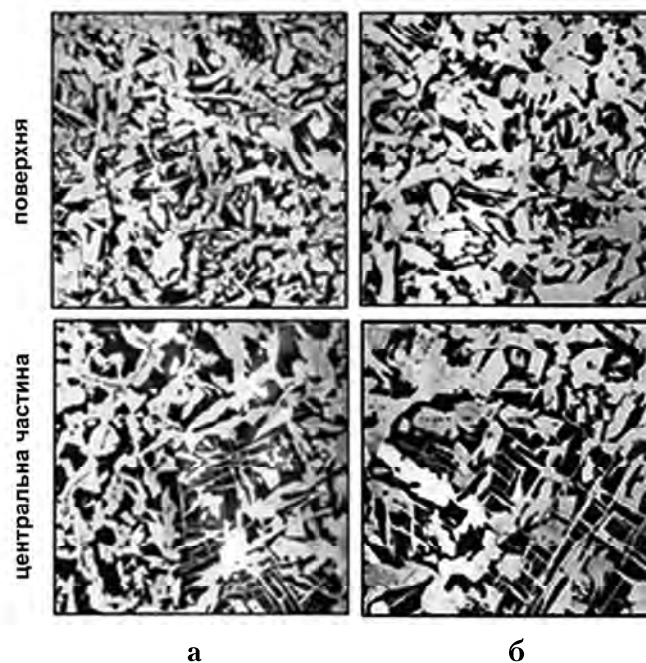


Рис. 4. Структури віброобробленого (а) та контрольного (б) зливків сталі 40ХН. $\times 100$.

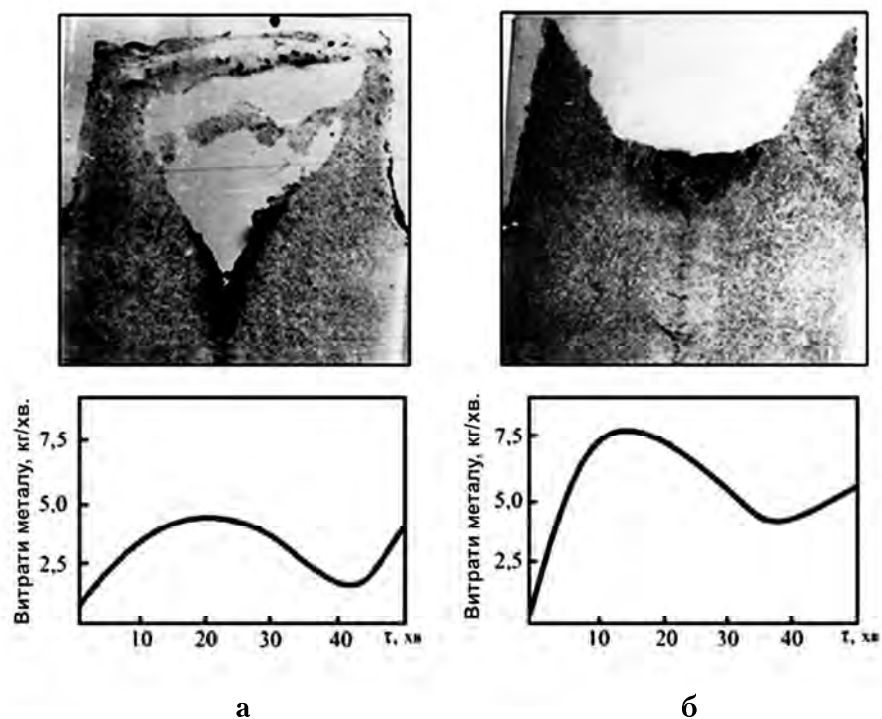


Рис. 5. Порожнина усадки і витрати металу на усадку контрольного (а) і віброобробленого (б) зливків сталі 40ХН.

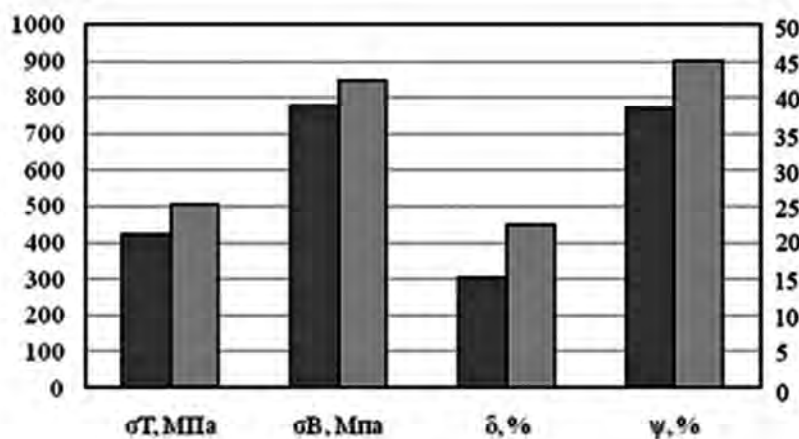


Рис. 6. Механічні властивості прокату сталі 40ХН залежно від умов тверднення зливків.
 ■ – контрольний, ■ – віброоброблений.

Література

1. Посламовская Ю. А., Жульев С. И., Горунев А. И. Исследование кристаллического строения донной части крупных кузнечных слитков // Известия Волгоградского ГТУ, серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении», вып. 2. Волгоград 2008. – № 10. – С. 152-154.
2. Дуб В. С. Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках. Автореферат д.т.н., ЦНИИТМАШ, 1980. – 20с.

3. Suzuki K., Miyamoto T. Study on the formation of «A» segregates in Steel ingot // Trans ISI.J. 1978. – Vol.18. – P. 80. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.80>
4. Кондратюк С.Є., Щеглов В. М., Вейс В. І. Кристалізація і структура сталевих зливків за умов ендогенної обробки // Металознавство та обробка металів. – 2018. – №3. – С. 41-47.<https://doi.org/10.15407/mom2018.03.041>
5. Ефимов В. А., Щеглов В. М. Вибрационная обработка стальных слитков в процессе кристаллизации // Процессы разливки стали и качество слитка. Сб. научн. тр. ИПЛ АН УССР. – Киев, 1980. – С. 4-66.
6. Щеглов В. М., Кондратюк С. Е., Вейс В. І. Фізичне моделювання кристалізації зливків за умов ендогенної вібраційної обробки // Металознавство та обробка металів. – 2018. – №1. – С. 4-8.<https://doi.org/10.15407/mom2018.01.003>

References

1. Poslamovskaya Yu. A., Zhulyev S. I., Gorunov A. I., *Izvestiya Volgogradskogo GTU,seriya «Problemy materialovedeniya,svarki i prochnosti v mashinostroyenii»*, 2008, No. 10, Vol. 2, pp. 152-154 [in Russian].
2. Dub V. S. *Issledovaniye vnetsentrennoy likvatsii i razrabotka metodov podavleniya yeye razvitiya v krupnikh slitkakh* (Study of eccentric segregation and development of methods to suppress its development in large ingots), Abstract of Doctor of Technical Sciences, TSNIITMASH, 1980. – 20 p. [in Russian].
3. Suzuki K., Miyamoto T., *Trans ISI. J.*, 1978, Vol.18, pp. 80 [in English]. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.80>
4. Kondratyuk S.Ye., Shcheglov V. M., Veys V. I., *Metaloznastvo ta obrobka metaliv*, 2018, No. 3, pp. 41-47 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2018.03.041>
5. Yefimov V. A., Shcheglov V. M. *Vibratsionnaya obrabotka stal'nykh slitkov v protsesse kristallizatsii // Protsessy razlioki stali i kachestvo slitka*. Sb. nauchn. tr. IPL ANUSSR. – Kiyev, 1980. – S. 4-66.
6. Shcheglov V. M., Kondratyuk S. E., Veys V. I., *Metaloznastvo ta obrobka metaliv*, 2018, No. 1, pp. 4-8 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2018.01.003>

Одержано 08.06.20

V. M. Shcheglov, M. I. Tarasevich, S. Ye. Kondratyuk, V. I. Veis,
Z. V. Parkhomchuk, O. O. Tokareva

Thermal state and properties of steel ingot under conditions of endogenous vibration treatment of the melt during crystallization

Summary

In connection with the need to reduce the negative impact of the main defects of the forging ingots, the changes in their thermal state due to endogenous vibrational processing of the melt during crystallization are studied. Vibration processing of an ingot of steel 40XH weighing 7.6 tons was carried out in the upper part for 13 min after the completion of casting of steel at a frequency of 50 Hz and an amplitude of 1.5 mm. Based on the results of temperature measurements of the side surfaces in the upper, middle and bottom parts of the vibrated and control ingots, the regression equations were obtained for the change in their thermal state during crystallization

Плавлення і кристалізація

for 200 minutes. A regular increase in temperature was established under conditions of endogenous vibration processing up to 30 °C in the upper part of the ingot with its gradual decrease over 100 minutes, and in the middle part by 10-15 °C over 50 minutes. In the bottom part, no temperature differences were noted during the first 25 minutes. In the next time interval, the temperature of the research ingot steadily decreases by 35-50 °C compared with the control. The obtained results indicate an increase in temperature in the upper part of the experimental ingot due to endogenous vibration treatment of the solidifying melt and a regular redistribution of temperature fields along the height of the ingot. An increase in the temperature gradient in the indicated volumes of the ingot as a result of endogenous vibration processing leads to an increase in convection and mixing of the melt, advancement of the crystallization front mainly in the direction of the upper part, the formation of a fine-crystalline structure and a greater length of the bottom cone without contamination with non-metallic inclusions, a decrease in the manifestation of axial segregation and an increase in mechanical properties metal ingot. The use of endogenous vibration treatment of steel ingots during their crystallization is a promising technological solution that opens new opportunities for controlling the processes of crystallization and structure formation, improves the quality of metal properties of large forged ingots.

Keywords: ingot, steel, vibration treatment, crystallization, temperature, properties.

Журнал **МОМ** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу 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 "МОМ"

Копію документа передплати та відомості про передплатника

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