

## Вплив теплопровідності на схильність сталей до утворення зварних з'єднань

О. М. Савицький, кандидат технічних наук

М. М. Савицький, доктор технічних наук

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

*Встановлено, що схильність сталей до утворення зварних з'єднань залежить від їх теплофізичного стану. Аустенітна зона з мінімальною теплопровідністю і максимальною теплоємністю (тепловий бар'єр), що утворюється біля рідкої зварювальної ванни, накопичує і утримує значну кількість тепла та перешкоджає його відведенню із ванни в основний метал. Це призводить до перегріву металу з'єднання, утворення в ньому тріщин та крихкого руйнування. Показано, що підвищення швидкостей нагріву дозволяє скоротити тривалість існування теплового бар'єру і послабити його негативний вплив на формування з'єднань.*

Здатність сталей до утворення зварних з'єднань оцінюється за комплексом показників, основними з яких вважаються стійкість проти утворення гарячих і холодних тріщин, перегріву і крихкого руйнування [1 – 4]. З цих позицій сталі поділяють на групи – зварюваних без обмежень, обмежено зварюваних та не рекомендованих для зварювання [5].

Стійкість до утворення гарячих тріщин оцінюється за показником Уілкінсона [6] HCS, який розраховується за масовими частками елементів С, S, P, Si, Ni, Mn, Cr, Mo, V, що входять до складу сталей. Якщо для легованих сталей  $HCS > 2$ , а для вуглецевих  $HCS > 4$ , то такі зварні з'єднання схильні до утворення гарячих тріщин. Існують і інші показники для оцінки схильності сталей до утворення гарячих тріщин, але всі вони враховують лише хімічний склад металу [6].

Схильність зварних з'єднань до утворення холодних тріщин оцінюється за вуглецевим еквівалентом [1, 6]  $C_e$ , який також обраховується за масовими частками елементів С, Mn, Cr, V, Mo, Ni, Cu, P у складі сталей. У випадку, коли  $C_e > 0,45$  зварні з'єднання схильні до утворення холодних тріщин. В різних країнах розроблено кілька варіантів розрахунку вуглецевого еквіваленту [6].

Стійкість проти крихкого руйнування оцінюється за показниками твердості  $HV_{max}$  [6], яка також визначається з урахуванням масових часток С, Si, Mn, Ni, Cr.

Якщо  $HV$  досягає 350 – 400, то метал схильний до крихкого руйнування.

Усі наведені методики оцінки основних показників зварюваності сталей враховують лише їх хімічний склад, хоча результати останніх досліджень [7] свідчать, що зварюваність сталей безпосередньо пов'язана із їх теплофізичним станом. Однак особливості його зміни при нагріванні і

оохолодженні не враховуються навіть при розрахунках теплових процесів за методиками М. М. Рикаліна, В. В. Фролова та К. В. Багрянського [2, 8, 9], де прийняті усереднені значення коефіцієнта теплопровідності та теплоємності металу при  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тому метою роботи було оцінити вплив теплофізичного стану сталей і особливо теплопровідності на показники їх зварюваності.

На рис. 1 наведено залежності теплопровідності заліза і сталей різних систем легування від температури нагріву, побудовані з урахуванням літературних даних [5, 10]. Вони свідчать, що наявність в сталі 0,08 % вуглецю знижує її теплопровідність на третину порівняно з чистим залізом (рис. 1 а), а при підвищенні його вмісту до 0,8 % теплопровідність сталей знижується майже вдвічі. Легування вуглецевих сталей Mn, Cr, Ni, Si (рис. 1 б – г) та іншими елементами посилює цю негативну тенденцію. Негативний вплив марганцю проявляється при його вмісті до 2 % і посилюється із підвищенням вмісту в сталі вуглецю (рис. 1 б). Негативний вплив хрому проявляється при великому його вмісті в сталі (рис. 1 в, крива 5). Нікель при вмісті в сталях понад 1 – 2 % також різко зменшує їх теплопровідність (рис. 1 в, крива 4).

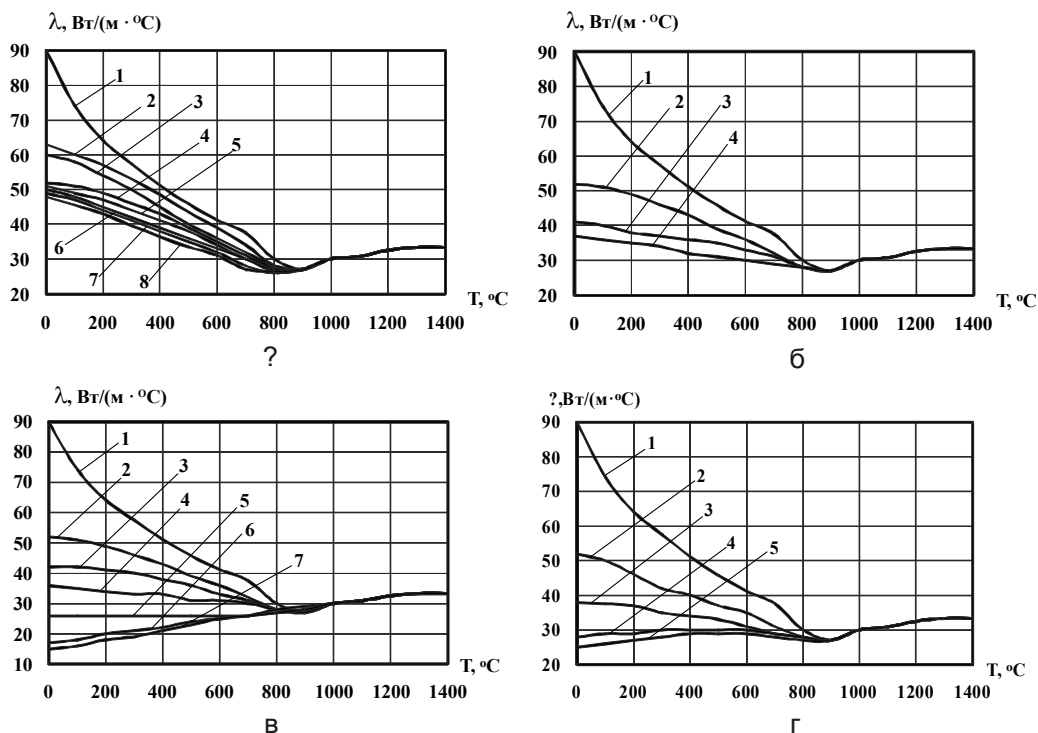


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності сталей від температури і впливу легуючих елементів. а – вуглецю (1 – чисте залізо; 2 – 0,08 % С; 3 – 0,1 % С; 4 – 0,2 % С; 5 – 0,3 % С; 6 – 0,4 % С; 7 – 0,5 % С; 8 – 0,8 % С); б – марганцю (1 – чисте залізо, 2 – сталь 35, 3 – 35Г2, 4 – 65Г); в – хрому і нікелю (1 – чисте залізо, 2 – сталь 20, 3 – 20Х, 4 – 20ХН3А; 5 – 20Х13; 6 – 08Х18Н10, 7 – 12Х18Н9Т); г – кремнію (1 – чисте залізо, 2 – 38Х, 3 – 38ХС, 4 – 60С2А, 5 – 70С3А).

В аустенітних сталях, легованих великими кількостями хрому і нікелю, теплопровідність мінімальна (рис. 1 в), в 5 – 6 разів нижча, ніж у заліза.

## Структура, зношування, руйнування

Кремній навіть при вмісті до 1 % різко знижує теплопровідність металу і цей вплив посилюється по мірі зростання в сталях вмісту його і вуглецю (рис. 1 г). Зменшення теплопровідності сталей по мірі збільшення вмісту вуглецю і ступеня легування негативно впливає на показники їх зварюваності через погіршення тепловідводу із зварювальної ванни та біляшовної зони в основний метал. Це призводить до утворення гарячих тріщин в шві, перегріву та гартування металу зони термічного впливу і утворення холодних тріщин. Погіршуються показники в'язкості і пластичності металу зварних з'єднань. Прикладом є зварне з'єднання сталі М72, виконане дротом 65Г, хімічний склад і теплопровідність яких наведено в табл. 1, а механічні властивості – в табл. 2.

Таблиця 1

Хімічний склад і коефіцієнт теплопровідності сталей М72 і 65Г

Марка сталі	Масова частка елементів, %								λ, Вт/(м·°С) + 20°С
	С	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	
				не більше					
М72	0,67-0,78	0,18-0,45	0,75-1,05	0,040	0,035	-	-	-	49
65Г	0,62-0,70	0,90-1,20	0,17-0,37	0,035	0,035	0,25	0,20	0,25	37

Таблиця 2

Механічні властивості зварних з'єднань сталі М72, виконаних дротом 65Г

Ділянка зварного з'єднання	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	КСV, Дж/см <sup>2</sup>
Основний метал	516	104	10,0	3,7
Шов	935	1245	8,6	2,7
Зона термічного впливу	1090	1325	7,3	2,0

Крім цього, теплопровідність сталей залежить від їх теплового стану. Для вуглецевих сталей при нагріванні вона знижується, а при охолодженні зростає. В температурному інтервалі приблизно 700 – 900 °С теплопровідність вуглецевих сталей досягає мінімуму, який співпадає з теплопровідністю заліза і при подальшому підвищенні температури сталі поводяться як чисте залізо (рис. 1 б – г). Вказана температурна область охоплює міжкритичні інтервали Ас<sub>1</sub> – Ас<sub>3</sub> вуглецевих сталей, в яких відбувається аустенітизація металу. Аустенітизація відбувається з поглинанням значної кількості тепла (рис. 2 а, б), наслідком чого є мінімальна теплопровідність. Після завершення аустенітного перетворення теплопровідність сталей до певної міри зростає і стабілізується (рис. 1 а – в).

Характер зміни теплопровідності аустенітних сталей інший. Вона зростає по мірі підвищення температури нагріву (рис. 1 в), досягаючи максимуму, який співпадає з мінімальною теплопровідністю заліза і вуглецевих сталей. Така особливість зміни теплопровідності аустенітних сталей зумовлює високу схильність їх зварних з'єднань до утворення гарячих тріщин.

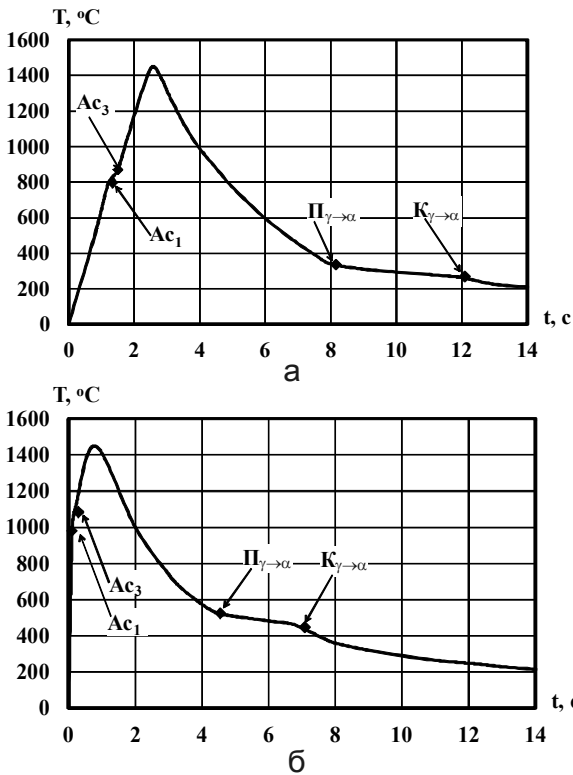


Рис. 2. Термічні цикли з інтервалами аустенізації та розпаду переохолодженого аустеніту в сталі типу 40ХН:  $P_{\gamma \rightarrow \alpha}$  і  $K_{\gamma \rightarrow \alpha}$  – температури початку і кінця розпаду аустеніту; а –  $V_n = 600 - 700 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ; б –  $V_n = 2000 - 2200 \text{ }^\circ\text{C/c}$ .

Вони змінюються в широкому інтервалі значень і зростають в міру підвищення швидкості нагріву металу. Тобто, збільшуючи швидкість нагріву металу зварного з'єднання, можна зміщувати аустенітизацію і утворення теплового бар'єру в область більш високих температур, як це показано на рис. 2 на прикладі сталей типу 40ХН. При нагріванні з середньою швидкістю  $600 - 700 \text{ }^\circ\text{C/c}$  тепловий бар'єр (аустенітизація) утворюється в інтервалі температур  $790 - 870 \text{ }^\circ\text{C}$ . Підвищення швидкості нагрівання до  $2000 - 2200 \text{ }^\circ\text{C/c}$  зміщує аустенітизацію і утворення теплового бар'єру в область температур  $980 - 1105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Відповідно змінюються і температурні інтервали розпаду аустеніту. В першому випадку (рис. 3) ці процеси відбуваються при температурах  $340 -$

В аустенітному стані метал характеризується низькою теплопровідністю і великою теплоємністю, та здатен накопичувати і утримувати значну кількість тепла, це також перешкоджає його відведенню із зварювальної ванни [7]. На стадії охолодження тепловий бар'єр відіграє негативну роль у формуванні зварного з'єднання, його структури та властивостей. Цей вплив посилюється по мірі збільшення тривалості існування теплового бар'єру та його розмірів.

Процесом утворення і усунення теплового бар'єру при зварюванні вуглецевих сталей можна керувати. На рис. 3 [11] наведено залежності температур критичних точок  $Ac_1$  і  $Ac_3$  від швидкостей нагріву ( $V_n$ ), які свідчать, що температури критичних точок не постійні.

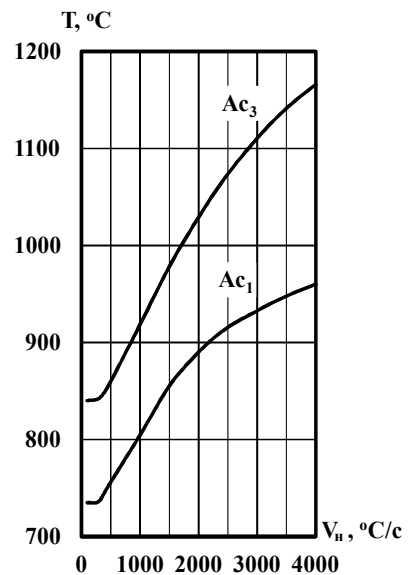


Рис. 3. Область росту температур критичних точок  $Ac_1$  і  $Ac_3$  в залежності від швидкості нагріву металу ( $V_n$ ) для сталей з вмістом вуглецю  $0,2 - 0,8 \%$  [11].

260 °С, які охоплюють нижню приграничну частину бейнітної і верхню частину мартенситної областей.

Тривале існування теплового бар'єру негативно впливає на показники зварюваності сталей. Його низька теплопровідність спричиняє утворення гарячих тріщин в металі шва. А в біляшовній зоні, завдяки високій теплоємності аустеніту і накопиченню тепла, призводить до перегріву металу та підвищення його схильності до крихкого руйнування. Мартенситна точка для сталі типу 40ХН становить 305 °С. Структура металу в зоні термічного впливу представлена бейнітно-мартенситною сумішшю з переважаючим вмістом мартенситу, який схильний до утворення холодних тріщин [1 – 4, 12].

В другому випадку, коли розпад аустеніту і усунення теплового бар'єру відбуваються при температурах 530 – 460 °С (рис. 3), тобто в середній частині бейнітної області (ближче до її нижньої границі), бейнітна структура металу характеризується достатньо високими показниками пластичності, в'язкості і стійкістю проти утворення холодних тріщин [1 – 4, 12]. Крім цього, скорочення тривалості існування теплового бар'єру позитивно позначається на стійкості металу шва проти утворення гарячих тріщин та підвищенні стійкості металу навколошовної зони проти крихкого руйнування.

Тепло, яке виділяється при  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворенні сприяє розвитку процесів самовідпуску і зниженню напружень, зумовлених структурними перетвореннями. А тому чим вищі температури  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, тим ефективніше це тепло витрачається.

Тривалість існування та розміри теплового бар'єру при зварюванні визначаються тепловкладенням у зварні з'єднання, яке в свою чергу залежить від погонної енергії зварювання [1 – 3, 8, 9]:

$$\frac{q}{V_{зв.}} = \frac{IU\eta}{V_{зв.}},$$

де  $q$  – теплова потужність дуги;  $V_{зв.}$  – швидкість зварювання;  $I$  – зварювальний струм;  $U$  – напруга на дузі;  $\eta$  – ефективний коефіцієнт корисної дії дуги.

Розміри і тривалість існування теплового бар'єру зменшуються по мірі зменшення погонної енергії зварювання. Вона також визначає швидкість нагріву металу ( $V_{н.}$ ), яка зростає при її зменшенні. Погонна енергія представляє собою відношення теплової потужності дуги ( $q$ ) до швидкості зварювання ( $V_{зв.}$ ), тому зміна цих параметрів, спрямована на зменшення погонної енергії, завжди супроводжується підвищенням швидкостей нагріву (рис. 4), а також підвищенням температур утворення та усунення теплового бар'єру, а також зменшенням тривалості його існування.

Таким чином показано, що зварюваність сталей суттєво залежить від теплофізичних параметрів. Це дозволяє реалізувати керування процесами формування структури і властивостей зварних з'єднань, зменшуючи погонну енергію і орієнтуючись на зварювальні процеси з низькою енергоємністю і

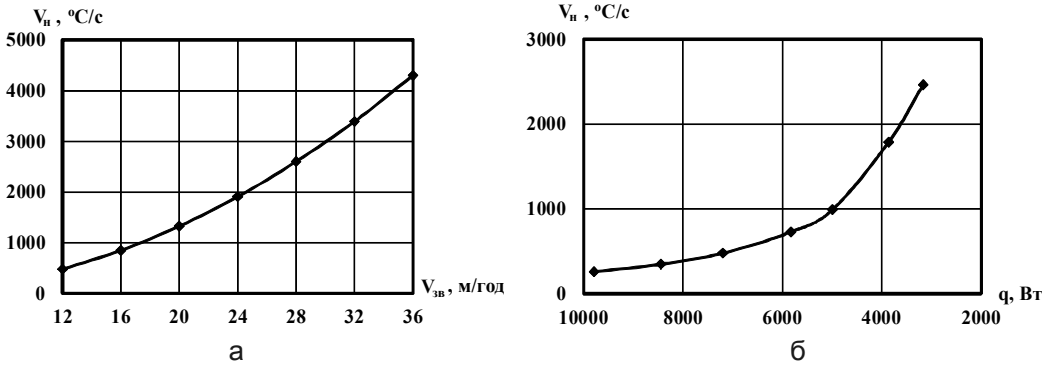


Рис. 4. Залежність швидкостей нагріву металу в зоні термічного впливу зварного з'єднання від швидкості зварювання (а) та теплової потужності дуги (б).

високою концентрацією нагріву, такі як дугове зварювання в захисних газах з активуючими флюсами, лазерні і гібридні технології та інші, що забезпечують мінімальне тепловкладення в метал.

## Література

1. Технология электрической сварки плавлением / Под общ. ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. – Киев: Вища школа, 1976. – 424 с.
3. Акулов А. И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
4. Макара А.М., Мосендз Н.А. Сварка высокопрочных сталей. – Київ: Техніка, 1971. – 140 с.
5. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В.Г. Сорокина – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
6. Ромашкин А.Н. Свариваемость сталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://steelcast.ru/weldability/>.
7. Савицький О.М. Теплофізичний стан вуглецевих сталей та його вплив на формування теплового бар'єру при локальній термічній дії // Металознавство та обробка металів. – 2015. – №3. – С. 28 – 34.
8. Рыкалин Н.Н. Тепловые процессы при сварке плавлением. – Профиздат, 1959. – 96 с.
9. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа. – 1988. – 560 с.
10. Зиновьев Б.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
11. Савицький О.М., Шрабалоук Ю.М. Особливості впливу високих швидкостей нагріву на температурний інтервал гомогенізації аустеніту і росту вторинного зерна у вуглецевих сталях // Металознавство та обробка металів. – 2013. – №3. – С. 31 – 37.
12. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1966. – 680 с.

## Refereces

1. Paton B.E. (Eds.) (1977). *Tehnologija elektricheskoi svarki plavleniem [Technology of electrical fusion welding]*. Moskow: Mashinostroenie [in USSR].
2. Bagrianskij K.V., Dobrotina Z.A., & Hrenov K.K. (1976). *Teorija svarochnyh processov [Theory of welding processes]*. Kyiv: Vyscha shkola [in USSR].

3. Akulov A.I., Belchuk G.A., & Demiancevich V.P. (1977). *Tehnologija i oborudovanie svarki plavljeniem [Technology and equipment for melting welding]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
4. Makara A.M., & Mosendz N.A. (1971). *Svarka vysokoprochnyh stalei [Welding of high-strength steels]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].
5. Sorokin V.G. (Eds.) (1989). *Marochnik stalei i splavov [Stamps of steels and alloys]*. Moskow: Mashinostroenie [in USSR].
6. Romashin A.N. Svarivaemost stalei [Weldability of steels]. *steelcast.ru*. Retrived from <http://steelcast.ru/weldability/> [in Russian].
7. Savytskyi, O.M. (2015). Teplofizychnyi stan veglecevyh stalei ta iogo vplyv na formuvannja teplovogo barieru pry lokalni termichni dii [Thermal physical condition carbon steel and its effect on the formation of a thermal barrier at a local thermal effect]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metal science and metalworking*, 3, 28-34 [in Ukrainian].
8. Rykalin N.N., & Pugin A.I., (1959). *Teplovyje processy pri svarke plavljeniem [Thermal processes in fusion welding]*. Profizdat [in Russian].
9. Frolov V.V. (1988). *Teoria svarochnih processov [Theory of welding processes]*. Moskow: Vysshaia skola [in Russian].
10. Zinoviev B.E. (1989). Teplofiziche svoistva metallov pri vysokih temperaturah [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moskow: Metallurgija [in Russian].
11. Savytskyi, O. M. & Shkrabakiuk Ju. M. (2013). Osoblyvosti vplyvu vysokyh shvydkosteï nagryvu na temperaturnyi interval gomogenizacii austenitu i rosty vtorynnogo zerna e deglecevyh staliah [Especially the effect of high heating rates on homogenization temperature range of austenite and secondary grain growth in carbon steels]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metal science and metalworking*, 3, 31-37 [in Ukrainian].
12. Guliaev A.P. (1966). *Metallovedenie [Metal Science]* Moskow: Metallurgija [in Russian].

Одержано 04.04.17

**А. М. Савицкий, М. М. Савицкий**

### **Особенности влияния теплопроводности на склонность сталей к образованию сварных соединений**

#### **Резюме**

Установлено, что склонность сталей к образованию сварных соединений зависит от их теплофизического состояния. Аустенитная зона с минимальной теплопроводностью и максимальной теплоемкостью – тепловой барьер, образующийся вокруг жидкой сварочной ванны, накапливает и удерживает значительное количество тепла и препятствует его отвода из ванны в основной металл. Это приводит к перегреву металла соединения, образование в нем трещин и хрупкого разрушения. Повышение скорости нагрева позволяет сократить длительность существования теплового барьера и ослабить его негативное влияние на структуру и свойства сварных соединений.

O. M. Savitsky, M. M. Savitsky

**Features thermal conductivity effect on the propensity of steel  
to form welds**

**Summary**

It is established that the propensity of steels to form welded joints depends on their thermophysical state. An austenitic zone with a minimum thermal conductivity and a maximum heat capacity (thermal barrier), formed around the liquid weld pool, accumulates and retains a significant amount of heat and prevents its removal from the bath to the base metal. This leads to overheating of the metal compound, the formation of cracks in it and brittle fracture. It is shown that an increase in the heating rates makes it possible to shorten the duration of the thermal barrier and to weaken its negative effect on the formation of compounds.

*Вітання ювіляру*



*Колектив ФТІМС НАН України,  
редакція журналу «МОМ»,  
колеги і друзі щиро поздоровляють*

*Примака Івана Никаноровича,*

*відомого вченого в галузі металургії  
і ливарного виробництва,*

*з 85-річчям від дня народження,*

*зичать йому міцного здоров'я, щастя і творчого неспокою.*

