

УДК 699.15-194:669.[017+48+117.035.45-042.3]

ВПЛИВ РОЗПЛАВІВ СВИНЦЮ НА ОКРИХЧЕННЯ ХРОМИСТИХ СТАЛЕЙ ФЕРИТНОГО ТА АУСТЕНИТНОГО КЛАСІВ

В. М. ФЕДІРКО, І. С. КУХАР, І. М. ПОГРЕЛЮК, Х. Р. МЕЛЬНИК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Вивчено вплив рідкометалевих середовищ свинцю та евтектичної суміші свинець–вісмут на механічні властивості хромистих та хромонікелевих сталей феритного (Fe–11Cr) та аустенітного (X18H10T) класів за одновісного розтягу в діапазоні 350...600°C. Для сталі Fe–11Cr (SUN 409L) максимальне зниження пластичності у свинці до 14% зафіксовано при 450°C. Для аустенітної X18H10T в усьому температурному інтервалі випробувань значення коефіцієнта впливу середовища перевищує одиницю, тобто пластичність у досліджуваних середовищах вища, ніж у вакуумі, тому сталь за статичного навантаження одновісним розтягом у рідкометалевому середовищі не окрихчується.

Ключові слова: феритна та аустенітна сталі, розплав свинцю, рідкометалеве окрихчення.

Вступ. Одним із явищ, притаманних системі твердий метал–рідкометалеве середовище, є рідкометалеве окрихчення (РМО) [1, 2], коли пластичність твердого металу під час взаємодії з рідким під прикладеними механічними навантаженнями знижується. Існує декілька передумов, які сприяють прояву РМО: слабка взаємна розчинність твердого та рідкого металів, які не повинні формувати інтерметалідів за високих температур, достатня навантаженість твердого металу для виникнення пластичної деформації [3–5]. Його обумовлює поверхнева фізико-хімічна взаємодія між твердим та рідким металом, яка може обмежуватись лише адсорбцією, або ж супроводжуватись корозією твердого металу у рідкому та дифузійною рідкого металу у твердий. Вважають, що однією з причин окрихчення є зниження вільної енергії на межі твердої та рідкої фаз [5, 6]. РМО проявляється у певному температурному діапазоні. Його нижня межа, як правило, близька до температури плавлення рідкометалевого середовища. Однак деякі дослідники стверджують, що у деяких системах воно починається і за нижчих або вищих температур [6, 7]. Також виявили [7–9], що температурний інтервал РМО залежить від умов випробування, структури та складу матеріалу.

Тому мета дослідження – оцінити вплив структурно-фазового складу хромистих сталей на прояв РМО у свинцевих розплавах.

Матеріали і методика. Випробовували хромисті та хромонікелеві сталі різного структурного класу – феритну Fe–11Cr (SUN 409L) та аустенітну X18H10T за одновісного розтягу у вакуумі та у розплавах свинцю та евтектики свинець–вісмут у діапазоні 350...600°C. Швидкість навантаження 0,08 mm/s, що відповідає швидкості деформації $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Для кращої взаємодії рідкометалевого середовища з поверхнею сталей зразки заздалегідь лудили. Спочатку їх поверхню обробляли флюсом FeCl₃, щоб зняти поверхневий оксидний шар, а далі наносили на неї свинець.

У барокамері в атмосфері спектрально чистого аргону зразки розміщували у спеціальній ампулі та заливали розплавом свинцю при 350°C. Після охолодження

ампулу зі зразками розташовували у дослідницькій установці. Для випробувань одновісним розтягом використовували багатопозиційне обладнання, щоб визначити механічні характеристики конструкційних матеріалів у газових і рідкометалевих середовищах у широкому температурному діапазоні (від 20 до 900°C).

Після випробувань зразки виплавляли зі свинцю, внаслідок чого на їх поверхні та у зонах руйнування залишався свинець, що ускладнювало подальші дослідження. Тому зразки поміщали у барокамеру, де в інертній атмосфері за допомогою рідкого літію його усували. Для оцінки негативного впливу рідкометалевого середовища використовували “коефіцієнт впливу середовища” K (K_δ чи K_σ), який описує залежність

$$K_\delta = \delta_{\text{Рб}} / \delta_{\text{vac}}, \quad (1)$$

де $\delta_{\text{Рб}}$, δ_{vac} – пластичність у свинці та вакуумі.

Результати досліджень та їх обговорювання. Сталь Fe-11Cr (SUH 409L).

Зразки термічно обробляли за температури 1100°C упродовж 2 h з охолодженням на повітрі. Структура сталі після термічної обробки така: ферит, твердість $HV_{20} = 100$; $\sigma_B = 298$ МПа; $\delta = 14\%$. Зміну границь міцності та пластичності вивчали у вакуумі ($p = 10^{-2}$ Pa) та розплаві свинцю в інтервалі 350...600°C (рис. 1).

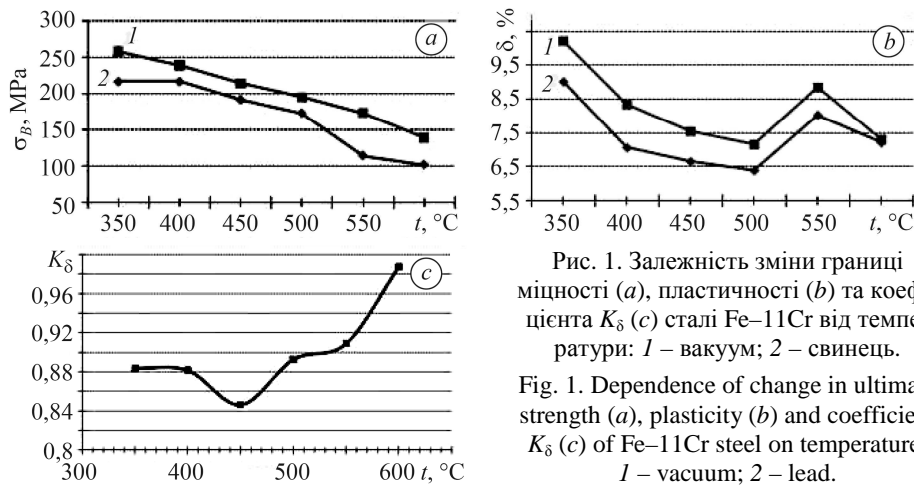


Рис. 1. Залежність зміни границі міцності (a), пластичності (b) та коефіцієнта K_δ (c) сталі Fe-11Cr від температури: 1 – вакуум; 2 – свинець.

Fig. 1. Dependence of change in ultimate strength (a), plasticity (b) and coefficient K_δ (c) of Fe-11Cr steel on temperature: 1 – vacuum; 2 – lead.

Виявили, що у свинці у всьому температурному інтервалі досліджень границя міцності сталі менша, ніж у вакуумі. Зокрема, при 350 і 550°C вона становить 15 і 34% відповідно (рис. 1a). Аналогічну залежність зафіксували і для пластичності в інтервалі 400...450°C: її значення у середовищі свинцю на 13...15% нижчі, ніж у вакуумі (рис. 1b). Зміна коефіцієнта K_δ сталі Fe-11Cr свідчить, що у середовищі свинцю пластичність максимально знижується при 450°C (рис. 1c).

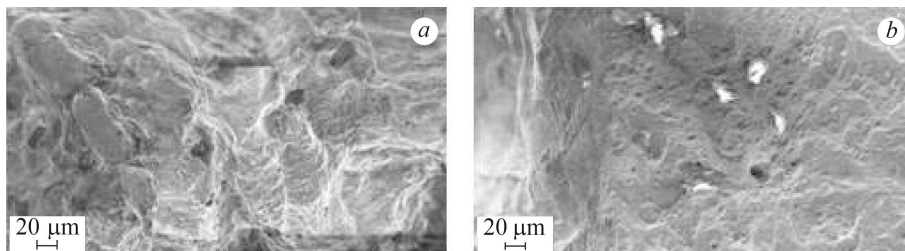


Рис. 2. Характер руйнування сталі Fe-11Cr у вакуумі (a) та у свинці (b) при 450°C.

Fig. 2. Fracture character of Fe-11Cr steel in vacuum (a) and lead (b) at 450°C.

Фрактографічні дослідження (рис. 2) підтверджують окрихчувальний вплив свинцю. Збільшення його частки зафіксували у приповерхневих шарах (рис. 2b).

Тріщини утворюються у приповерхневій зоні контакту зі свинцем й далі поширюються до серцевини з домінуванням в'язкого руйнування. У вакуумі руйнування відбувається за в'язким механізмом і супроводжується утворенням та коагуляцією пустот, що призводить до формування ямкової мікроструктури зламу (рис. 2а). Тому можна стверджувати, що сталь руйнується за мішаним в'язко-крихким механізмом. У сталях феритного класу проявляється ефект РМО.

Сталь X18H10T. Результати зміни границі міцності та пластичності зразків сталі X18H10T у вакуумі, свинці та евтектиці свинець-вісмут залежно від температури подані на рис. 3. Виявили (рис. 3а), що в інтервалі 350...400°C міцність у розплавах свинцю та евтектики порівняно з вакуумом знижується на 8...9%. З підвищенням температури до 450°C вона така ж, як і у вакуумі, а для евтектики знижується (приблизно на 17%) проти вакууму і при 600°C.

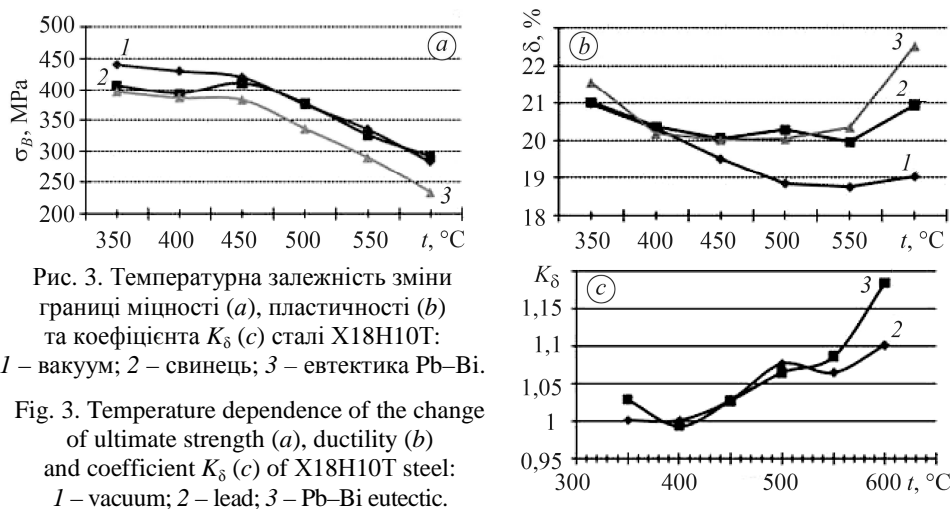


Рис. 3. Температурна залежність зміни границі міцності (а), пластичності (б) та коефіцієнта K_δ (с) сталі X18H10T: 1 – вакуум; 2 – свинець; 3 – евтектика Pb–Bi.

Fig. 3. Temperature dependence of the change of ultimate strength (a), ductility (b) and coefficient K_δ (c) of X18H10T steel: 1 – vacuum; 2 – lead; 3 – Pb–Bi eutectic.

Пластичність в інтервалі 350...400°C (рис. 3b) залишається практично однаковою в усіх середовищах. За температури вище 400°C сталь пластифікується як у середовищі свинцю, так і в евтектиці порівняно із вакуумом. Причому суттєво з ростом температури. Зокрема, при 600°C пластичність у свинці становить 21%, а в евтектиці – 22,5%.

В усьому температурному інтервалі випробувань значення K_δ перевищує одиницю, тобто пластичність у свинці та евтектиці вища, ніж у вакуумі, тому сталь під дією рідкометалевого середовища не окрихчується (рис. 3c). Цей факт підтверджують результати фрактографічних досліджень. У вакуумі формується властивий для в'язкого руйнування рельєф зламу, утворений сукупністю ямок (рис. 4а).

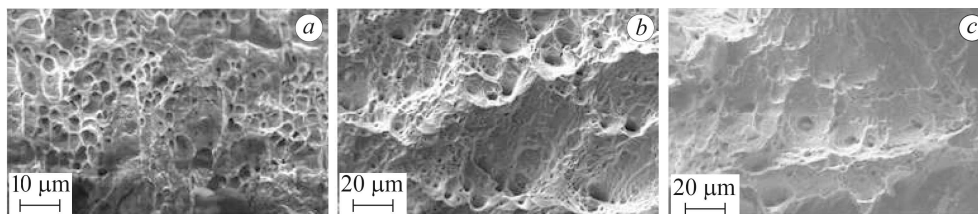


Рис. 4. Характер руйнування сталі X18H10T у вакуумі (а), свинці (б) та евтектиці Pb–Bi (с) за температури 450°C.

Fig. 4. Fracture character of X18H10T steel in vacuum (a) and lead (b) and Pb–Bi eutectic (c) at a temperature of 450°C.

Під час випробувань у розплавах свинцю та евтектики в'язкий характер руйнування не змінюється (рис. 4b, c). На поверхні зламу присутні притаманні в'язко-

кому руйнуванню чашки з глибокими ямками. Їх кількість дещо менша, але співмірна з розривом зразків у вакуумі. Характерних для крихкого руйнування гладкої поверхні зламу струмкоподібного візерунку, який утворюють сходинки на поверхні зламу, а також фасеток відколювання не виявили. Отже, для сталі X18H10T за статичного навантаження розтягом у середовищах свинцю та евтектики свинець–висмут РМО не зафіксували.

ВИСНОВКИ

Оцінено вплив структурно-фазового стану хромистої та хромонікелевої сталей на окрихчення у рідкометалевих розплавах свинцю та евтектики свинець–висмут за швидкості деформації $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ у діапазоні 350...600°C. Для сталі ферритного класу Fe–11Cr (SUN 409L) максимальний ефект окрихчення проявляється за температури 450°C, що і супроводжується зниженням пластичності до 16%. Для сталі аустенітного класу X18H10T за аналогічних умов цей ефект не виявлено, а за температури вище 400°C вона пластифікується до 8%.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние жидкометаллических сред свинца и эвтектической смеси свинец–висмут на механические свойства хромистой и хромоникелевой сталей ферритного (Fe–11Cr) и аустенитного (X18H10T) классов в условиях одноосного растяжения в диапазоне 350...600°C. Для стали Fe–11Cr (SUN 409L) максимальное снижение пластичности до 14% в среде свинца зафиксировано при 450°C. Для аустенитной X18H10T во всем температурном интервале испытаний значение коэффициента влияния среды превышает единицу, т.е. пластичность в средах свинца и эвтектики выше, нежели в вакууме, поэтому сталь при статической нагрузке одноосным растяжением под воздействием жидкометаллической среды не охрупчивается.

SUMMARY. The influence of the liquid metal medium of lead and eutectic lead-bismuth mixture on the mechanical properties of chromium and chromium–nickel steels of ferrite (Fe–11Cr) and austenitic (X18H10T) grades under the conditions of uniaxial tension in the temperature range of 350...600°C was investigated. It was shown that for ferrite Fe–11Cr (SUN 409L) steel the maximum reduction of plasticity in the liquid lead was observed at 450°C with a plasticity reduction up to 14%. For the austenitic X18H10T steel it was established that in the temperature range of testing the value of the coefficient of the medium influence exceeds unity, that is, the plasticity in lead environments and the lead-bismuth eutectic was higher than the corresponding values in the vacuum environment, and thus the steel embrittlement under static loading by uniaxial tension under the action of the liquid metal environment was not observed.

1. Никитин В. И. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. – М.: Атомиздат, 1967. – 444 с.
2. Дмуховская И. Г., Попович В. В. Влияние адсорбции среды на процесс деформирования твердых тел // Физ.-хим. механика материалов. – 1976. – **14**, № 4. – С. 60–66.
3. Дурагина З. А., Бондарь Е. Р., Пастухова Л. В. Механизм и характер взаимодействия хромистой нержавеющей стали с расплавами свинца и висмута // Физ.-хим. механика материалов. – 1987. – **23**, № 6. – С. 13–16.
4. Lynn J. C., Warke W. R., and Gordon P. Solid metal-induced embrittlement of steel // Mater. Sci. and Eng. – 1975. – **18**, № 1. – P. 51–62.
5. Попович В. В. О механизме адсорбционного облегчения усталостного разрушения стали в поверхностно-активных средах // Физ.-хим. механика материалов. – 1979. – **15**, № 1. – С. 52–55.
6. Гликман Е. Э., Горюнов Ю. В. Механизм жидкометаллической хрупкости и других проявлений эффекта Ребиндера в металлических системах // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – **14**, № 4. – С. 20–30.
7. Mechanical behaviour of the T91 martensitic steel under monotonic and cyclic loading in liquid metals / J.-B. Vogt, A. Verleene, I. Serre, and A. Legris // J. Nucl. Mat. – 2004. – **335**. – P. 222–226.
8. Susceptibility to LME of 316L and T91 steels by LBE: Effect of strain rate / Z. Hamouche-Nadjem, T. Auger, I. Guillot, and D. Gorse // J. Nucl. Mater. – 2008. – **376**. – P. 317–321.
9. Яськів О. І., Федірко В. М., Кухар І. С. Вплив структурного стану сталей на механічні властивості в кисневмісному свинці // Проблеми атом. науки та техніки. – 2016. – № 4. – С. 32–36.

Одержано 31.01.2019