

Раздел второй
**МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ
И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

УДК 669.295:621.795:620.193.199

**ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ НА МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ В КИСНЕВМІСНОМУ СВИНЦІ**

О.І. Яськів, В.М. Федірко, І.С. Кухар
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
E-mail: oleh.yaskiv@gmail.com

Досліджено закономірності впливу розплаву свинцю на механічні властивості сталей різних структурних станів: феритного (армко-залізо), феритоперлітного і термічно модифікованого сорбітного (40X13) у температурному інтервалі 250...550 °С. Встановлено, що для феритної структури свинець знижує пластичність на 2...6% з максимальним проявом рідкометалевого окрихчення при температурі 300 °С. Для сталі 40X13 в обох структурних станах під дією свинцю пластичність знижується на 1...2%, а максимальний ефект впливу рідкометалевого середовища проявляється за температур 250 та 300 °С відповідно для сорбітного і феритоперлітного станів. У свинцевому середовищі тріщини зароджуються й поширюються від поверхні контакту зі свинцем до серцевини, з переходом від крихкого механізму руйнування до в'язкого.

ВСТУП

Протягом останніх десятиріч зріс інтерес до проєктів ядерних енергетичних установок нового покоління, в тому числі таких, що передбачають рідкометалеву систему тепловідведення [1–5]. Матеріалознавчі та технологічні проблеми створення та вивчення конструкційних матеріалів є одними з основних на шляху успішної реалізації таких проєктів [6, 7]. В умовах взаємодії з розплавами важких металів (свинець та евтектика свинець–вісмут) важливою є опірність матеріалів окрихчувальній дії середовища, який проявляється в зниженні пластичності за температур, близьких до експлуатації. Найбільш перспективними з точки зору комплексу радіаційних, механічних і теплофізичних характеристик є сталі ферито-мартенситного класу з вмістом хрому 8...13% Cr [8–12]. Такі сталі можуть використовуватися для першої стінки і банкету реакторів синтезу, а також твелів швидких реакторів, і володіють сприятливою сумісністю з основними охолоджувальними середовищами [5, 8, 9].

Структурний стан сталей є важливим чинником, який значною мірою забезпечує згаданий комплекс властивостей. Тому метою даної роботи було дослідити закономірність впливу рідкометалевого середовища на механічні властивості сталей різних структурних станів.

1. МЕТОДИКА

Досліджували мікрозразки сталей феритного (армко-залізо) та феритоперлітного класів (40X13) з робочим перерізом 2 мм, вирізані з листового матеріалу завтовшки 1 мм. Безпосередньо перед обробкою їх промивали в бензині, ацетоні, спирті, а потім висушували. Робочу частину зразків доводили до необхідних розмірів і якості поверхні в твердосплавних шаблонах шліфувальним папером з нульовим розміром абразивного зерна. Перед

випробуваннями зразки відпалювали у вакуумі за температури 1050 °С впродовж 30 хв.

За допомогою термічної обробки (гартування: 1050 °С, 30 хв, вода; відпуск: 600 °С, 2 год, повітря) була сформована модифікована структура сталі 40X13 – сорбіт. Щоб запобігти окисленню поверхні та утворенню оксидної плівки під час термічної обробки зразки поміщали в захисні ампули з нержавіючої сталі, які заповнювалися спектрально-чистим аргоном для утворення інертного середовища.

Дослідження механічних властивостей проводили на багатопозиційній розривній машині Р-0.5 у вакуумі (10^{-5} Па) та статичному свинцевому середовищі, залишковий простір над яким заповнювали спектрально-чистим аргоном. Вміст кисню в свинці знаходився в межах 10^{-5} ... 10^{-6} ваг.% О. Багатопозиційність установки давала можливість забезпечити ідентичні умови випробувань для партії з шести зразків. Випробування проводили в температурному інтервалі 200...550 °С.

Щоб визначити механічні властивості зразків у металевих розплавах, використовували спецобладнання для роботи з рідкими металами (барокамеру, устаткування для плавки і заливки рідкометалевих середовищ). Об'єм камери над зразками в розплавах заповнювали спектрально-чистим аргоном, концентрація кисню в якому не перевищувала $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Перед випробуваннями зразки лудили свинцем за допомогою флюсу ClZn_2 для кращого змочування поверхні рідкими металами. Після випробування поверхню очищали від залишкового свинцю за допомогою розплаву літію в барокамері. Після виймання зразків з барокамери їх промивали під струменем проточної води.

Особливості зламів зразків досліджували на сканувальному електронному мікроскопі (Carl Zeiss AG – EVO-40 Series).

2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

2.1. РУЙНУВАННЯ У ВАКУУМІ

На рис. 1 наведені температурні залежності межі міцності для досліджувальних сталей в температурному інтервалі 200...450 °С для армко-заліза і сталі 40Х13 у сорбітному структурному стані та в інтервалі 200...550 °С для сталі 40Х13 у феритоперлітному структурному стані. Для усіх структурних станів сталей спостерігається закономірність зниження міцності зі збільшенням температури.

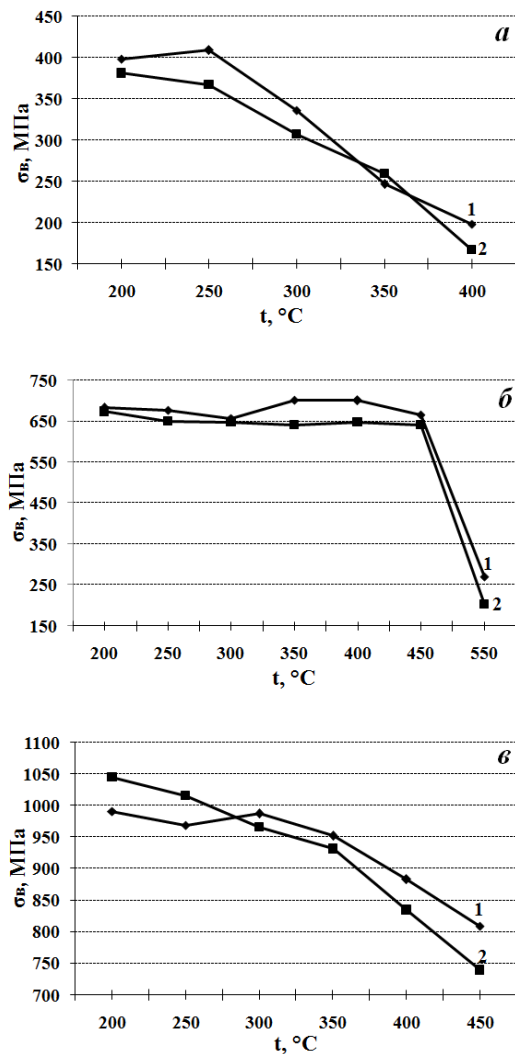


Рис. 1. Залежність межі міцності від температури: для армко-заліза (а); сталі 40Х13 у феритоперлітному структурному (б) та у сорбітному структурному (в) станах при випробуваннях у вакуумі (1) та свинці (2)

З підвищенням температури пластичність армко-заліза та сталі 40Х13 зростає (рис. 2). Для сталі 40Х13 у феритоперлітному структурному стані в температурному інтервалі 300...400 °С спостерігається незначне зниження пластичності (див. рис. 2,б), яке можна пов'язувати з деформаційним старінням, що має місце для маловуглецевих сталей [13–14] і полягає у виділенні фаз включення (карбіди, нітриди та ін.), які

знижують енергію, необхідну для поширення тріщини, й тим самим інтенсифікують швидкість її росту.

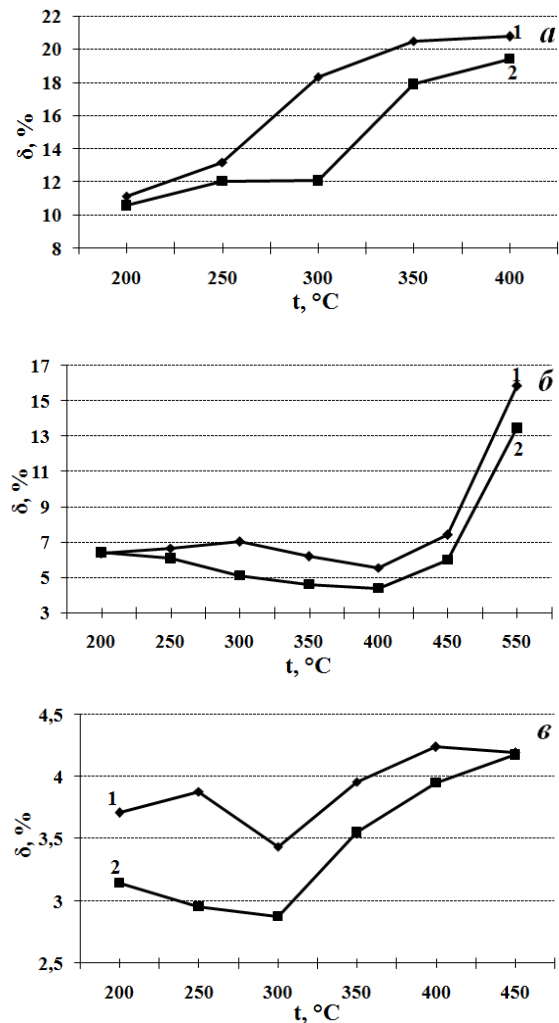


Рис. 2. Зміна пластичності залежно від температури: для армко-заліза (а); сталі 40Х13 у феритоперлітному структурному (б) та у сорбітному структурному (в) станах при випробуваннях у вакуумі (1) та свинці (2)

Для сталі 40Х13 у сорбітному структурному стані спостерігаємо аналогічну закономірність зміни пластичності, як і для структури ферит–перліт. Температурний інтервал деформаційного старіння зміщується в діапазон нижчих температур і проявляється в інтервалі 250...350 °С (див. рис. 2,в).

2.2. РУЙНУВАННЯ В СВИНЦІ

Рідкометалеве середовище не впливає на характер зміни міцності з температурою, а лише посилює ефект знеміцнення.

Пластичність армко-заліза з підвищенням температури зростає, але в порівнянні з вакуумом свинець знижує пластичність на 2...6%. Коефіцієнт впливу середовища K_δ , який виражає відношення пластичностей в свинці і вакуумі, засвідчує прояв рідкометалевого окрихчення в інтервалі температур 250...350 °С (рис. 3,а) з максимальним ефектом за температури 300 °С (K_δ зменшується на 35%).

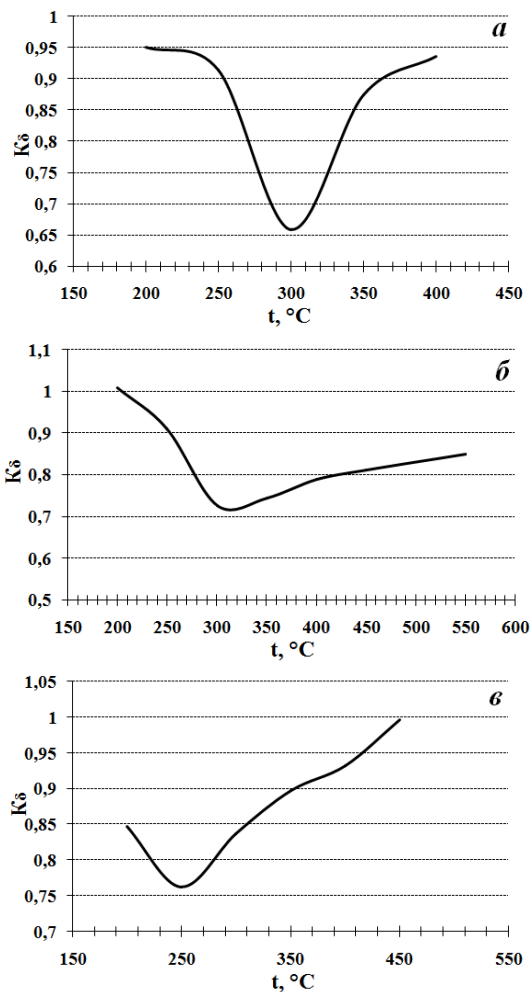


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнта впливу рідкометалевого середовища на пластичність K_{δ} : для армко-заліза (а); сталі 40X13 у феритоперлітному структурному (б) та в сорбітному структурному (в) станах

Для сталі 40X13 як у феритоперлітному структурному, так і в сорбітному структурному станах також спостерігається окрихувальний вплив свинцю на пластичність. Температурний інтервал рідкометалевого окрихчення не змінюється, а сам ефект нижчий, ніж для армко-заліза: K_{δ} зменшується максимально для феритоперлітного стану на 28% за температури 300 °C і для сорбітного стану на 24% за температури 250 °C (див. рис. 3,б,в).

2.3. ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно з фрактографічним аналізом, руйнування армко-заліза у вакуумі відбувається за в'язким механізмом і супроводжується утворенням та коагуляцією пустот, що призводить до формування ямкової мікроструктури зламу (рис. 4,а–в). У свинці руйнування відбувається за змішаним в'язко-крихким механізмом: тріщини утворюються в приповерхневій зоні контакту зі свинцем й далі поширюються до серцевини з домінуванням в'язкого руйнування (див. рис. 4,г–е).

Фрактографічний аналіз сталі 40X13 як у феритоперлітному, так і у сорбітному структурних станах після руйнування у вакуумі підтверджує невелику частку крихкого руйнування, викликаного

деформаційним старінням (рис. 5,а–б, рис. 6,а–б) у температурних інтервалах, визначених вище. З підвищенням температури частка крихкого руйнування практично зникає, і руйнування проходить за в'язким механізмом.

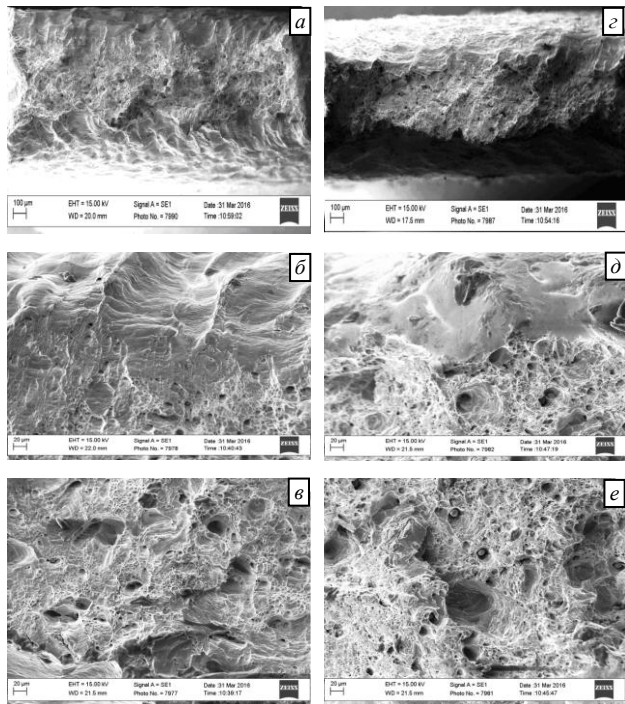


Рис. 4. Сканувальна електронна фрактографія поверхонь зламів армко-заліза у вакуумі (а–в) та у свинці (г–е)

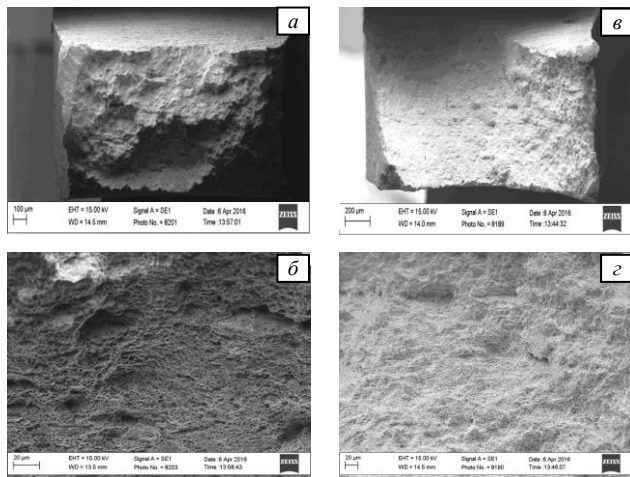


Рис. 5. Сканувальна електронна фрактографія поверхонь зламів феритоперлітної сталі 40X13 у вакуумі (а, б) та в свинці (в, г) за температури руйнування 300 °C

Фрактографічний аналіз зразків, розірваних у свинці, підтверджує прояв ефекту окрихчення, тому що збільшується частка крихкого руйнування за температур максимального прояву окрихчення. Як і для армко-заліза, так і для сталі 40X13 тріщини зароджуються й поширюються від поверхні контакту зі свинцем до серцевини, з переходом від крихкого руйнування до в'язкого (див. рис. 5,в,г, рис. 6, в,г).

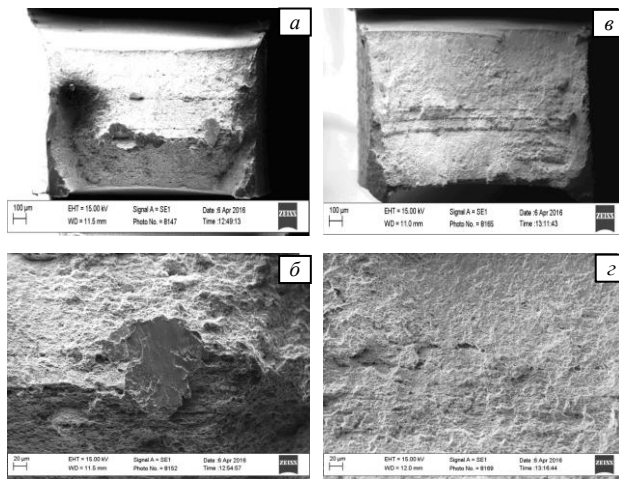


Рис. 6. Сканувальна електронна фрактографія поверхню зламів термічно модифікованої на сорбіт сталі 40X13: у свинці (а, б) та у вакуумі (в, г) за температури руйнування 250 °С

ВИСНОВКИ

Вивчено закономірності впливу структурного фактора сталей (фериту, феритоперліту, сорбіту) на механічні властивості в розплаві свинцю. Встановлено, що свинець знижує пластичність сталей в температурному інтервалі 250...350 °С, а максимальний прояв рідкометалевого середовища спостерігається для феритної структури при 300 °С (пластичність знижується на 35%), для феритоперлітної структури при 300 °С (на 28%) і для сорбітної структури при 250 °С (на 24%). У свинцевому середовищі тріщини зароджуються й поширюються від поверхні контакту зі свинцем до серцевини, з переходом від крихкого механізму руйнування до в'язкого.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. E.O. Adamov, V.V. Orlov. Nuclear development on the basis of new concept of nuclear reactors and fuel cycle, in: Proceedings of Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology // (HLMC-98). SSC RF-IPPE, Oblinsk, v. 1, 1999, p. 24.
2. C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono, F. Carmianti, N. Fietier, J. Galvez, C. Geles, Y. Kadi, P. Mandrillon, J.P. Revol, C. Roche. European Organization for Nuclear Research: CERN report AT/95-44 (ET), 1995.
3. Power reactors and sub-critical blanket systems with lead and lead-bismuth as coolant and/or target materials // International Atomic Energy Agency, Vienna IAEA-TECDOC-1348, May 2003, p. 224.
4. Comparative assessment of thermophysical and thermohydraulic characteristics of lead and lead-bismuth and sodium coolants for fast reactors // IAEA-TECDOC-1289, Vienna, 2002.
5. Design of an actinide burning, lead or lead-bismuth cooled reactor that produces low cost electricity // INEEL/EXT-01-01376. MIT-ANP-PR-083. FY-01 Annual report, October 2001, p. 181-223.
6. И.В. Горынин, Г.П. Карзов, В.Г. Марков, В.С. Лаврухин, В.А. Яковлев. Конструкционные материалы энергетических установок с тяжелыми жидкими металлами в качестве теплоносителей // Сборник докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск, 1999, т. 1, с. 128-135.
7. R.L. Klueh, D.S. Gelles, S. Jitsukawa, A. Kimura, G.R. Odette, B. van der Schaaf, and M. Victoria. Ferritic/martensitic steels – overview of recent results // Journal of Nuclear Materials. 2002, v. 307-311, Part 1, p. 466-465.
8. R.L. Klueh, N. Hashimoto, R.F. Buck, M.A. Sokolov. A potential new ferritic/martensitic steel for fusion applications // Journal of Nuclear Materials. 2000, v. 283-287, p. 697-701.
9. B. van der Schaaf, D.S. Gelles, S. Jitsukawa, A. Kimura, R.L. Klueh, A. Moslang, G.R. Odette. Progress and critical issue of reduced activation ferritic/martensitic steel development // Journal of Nuclear Materials. 2000, v. 283-287, p. 52-59.
10. A. Hishinuma, A. Kohyama, R.L. Klueh, D.S. Gelles, W. Dietz, K. Ehrlich. Current status and future R&D for reduced activation ferritic-martensitic steels // J. Nucl. Mater. 1998, v. 258-263, p. 193-204.
11. S. Malang. Development of insulating coatings for liquified metal blankets // Ibid. 1995, v. 27, p. 570-586.
12. B.F. Gromov et al. Use of lead-bismuth coolant in nuclear reactors and accelerator-driven systems // Nuclear Engineering and Design. 1997, v. 173, issues 1-3, p. 207-217.
13. И.А. Вакуленко, В.И. Большаков. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали: Монография. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2007, с. 191.
14. В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. Деформационное старение стали. М.: «Металлургия», 1972, с. 320.

Статья поступила в редакцию 09.06.2016 г.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ СВИНЦЕ

О.И. Яськив, В.М. Федирко, И.С. Кухар

Исследованы закономерности влияния расплава свинца на механические свойства сталей различных структурных состояний: ферритного (армко-железо), ферритоперлитного и термически модифицированного сорбитного (40X13) в температурном интервале 250...550 °С. Установлено, что для ферритной структуры свинец снижает пластичность на 2...6% с максимальным проявлением жидкометаллического охрупчивания при температуре 300 °С. Для стали 40X13 в обоих структурных состояниях под действием свинца пластичность снижается на 1...2%, а максимальный эффект воздействия жидкометаллической среды проявляется при температурах 250 и 300 °С соответственно для сорбитного и ферритоперлитного состояний. В свинцовой среде трещины зарождаются и распространяются от поверхности контакта со свинцом к сердцевине, с переходом от хрупкого механизма разрушения к вязкому.

THE EFFECT OF THE STRUCTURAL STATE OF STEELS ON THE MECHANICAL PROPERTIES IN THE OXYGEN SATURATED LEAD

O.I. Yaskiv, V.M. Fedirko, I.S. Kukhar

The regularities of the influence of liquid lead on the mechanical properties of steels in different structural states: ferritic (armco-Fe), ferritic-pearlitic and heat modified sorbite (40X13) in the temperature range 250...550 °C. It was found that for the ferritic structure lead reduces plasticity by 2...6% with a maximum manifestation of liquid metal embrittlement at 300 °C. Plasticity of 40X13 steel in both states under the influence of lead decreases by 1...2% and the maximum effect of the liquid metal embrittlement is shown at temperatures of 250 and 300 °C respectively for sorbitic and ferritic-pearlitic structural states. In lead cracks nucleate and propagate from the surface of contact with lead to the metal core with the transition from brittle to ductile mechanism.