

УДК 669.295:621.795

ВПЛИВ КИСЕНЬВМІСНИХ СВИНЦЕВИХ РОЗПЛАВІВ НА ДОВГОТРИВАЛУ МІЦНІСТЬ СТАЛІ AISI 409L ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

О. І. ЯСЬКІВ, В. М. ФЕДІРКО, І. С. КУХАР

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

Досліджено закономірності впливу розплавів свинцю та евтектики свинець–вісмут на довготривалу міцність сталі феритного класу AISI 409L (Fe–11Cr) в температурному інтервалі 500...600°C. Встановлено, що вони знижують опірність тривалому статичному навантаженню сталі порівняно з вакуумним середовищем. З підвищенням температури негативний вплив евтектики зростає внаслідок корозійної дії свинцевих розплавів, а саме селективного розчинення хрому вздовж меж зерен та утворення оксидів на основі заліза, які окрихчуються під навантаженням, що полегшує руйнування матеріалу.

Ключові слова: *феритна сталь, розплави свинцю та евтектики свинець–вісмут, довготривала міцність, рідкометалеве окрихчення.*

Розроблення ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) нового покоління з підвищеною безпекою передбачає серед іншого рідкометалеву систему охолодження. Розплави важких металів (Pb, Bi, Pb–Bi та їх евтектична суміш) завдяки своїм фізико-хімічним властивостям є кандидатними охолоджувальними середовищами реакторів на швидких нейтронах (типу LEADER, ALFREDO, БРЕСТ, СВБР, МБИР) і підкритичних гібридних систем, що керуються прискорювачем (ADS) [1–3]. Як основні конструкційні матеріали в ЯЕУ передбачають використовувати сталі феритно-мартенситного класу (на основі системи Fe–Cr), які завдяки високим фізико-механічним характеристикам, сумісності з основними охолоджувальними середовищами, а також низькій чутливості до розбухання є перспективними матеріалами для першої стінки і бланкета реакторів синтезу, а також твелів, парогенераторів та конструктивних елементів насосів теплоносія реакторів на швидких нейтронах [4, 5].

Під час експлуатації розплави важких металів негативно впливають на корозійні та механічні властивості конструкційних матеріалів [6]. Проблему корозійної агресивності свинцевих середовищ до сталей вирішують шляхом використання теплоносія з контрольованим вмістом кисню, що сприяє утворенню на поверхні сталей захисних оксидних плівок [7]. За довготривалої експлуатації, коли причиною руйнування елементів конструкцій ЯЕУ може бути пошкодження внаслідок повзучості матеріалів, важливим є вивчення впливу цих середовищ на механічну поведінку матеріалів за напружень, які нижчі границі текучості. В умовах взаємодії сталі з адсорбційно-активними середовищами (свинцевими розплавами) останні стають додатковими чинниками зниження руйнівних напружень та змінюють картину протікання відповідних етапів руйнування матеріалу.

Мета роботи – встановити закономірності впливу рідкометалевих середовищ (Pb, Pb–Bi) на міцність реакторної сталі (Fe–11Cr) під час довготривалих статичних навантажень за підвищених температур.

Матеріали і методика. Досліджували мікроразки сталі феритного класу 409L (Fe–11Cr) з робочим перерізом 2 mm, вирізані з листового матеріалу завтовшки 1 mm. Безпосередньо перед обробкою їх промивали в бензині, ацетоні, спирті, а потім висушували. Технологічний припуск, який після штампування становить 1 mm на сторону, видаляли шліфуванням. 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° впродовж 30 min.

Визначали довготривалу міцність за температур 500; 550 і 600°С на багато-позиційній розривній машині Р-0.5, розробленій у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, у вакуумі (10^{-5} Pa) та у середовищах розплавів свинцю і евтектики свинець–вісмут, залишковий простір над якими заповнювали технічно чистим аргонном. Багатопозиційність установки дає можливість забезпечити ідентичні умови випробувань для великої кількості зразків.

Щоб визначити механічні властивості зразків у металевих розплавах, використовували спецобладнання для роботи з рідкими металами (барокамера, устаткування для плавки і заливки рідкометалевих середовищ). Об'єм камери над зразками у розплавах заповнювали спектрально чистим аргонном, концентрація кисню в якому не перевищувала $5 \cdot 10^{-3}$ mmHg. Перед випробами зразки лудили свинцем та евтектикою за допомогою флюсу для кращого змочування металів.

Розподіл хімічних елементів та особливості зламів зразків досліджували на сканувальному електронному мікроскопі (Carl Zeiss AG – EVO-40 Series) з детектором для мікрорентгеноспектрального аналізу (EDX).

Результати досліджень та їх обговорення. Руйнування у вакуумі. Зі збільшенням тривалості випробувань міцність сталі зменшується (рис. 1a) за всіх температур випроб. Наприклад, границі довготривалої міцності на базі 10 h становлять 255 МПа при 500°С, 195 МПа при 550°С і 150 МПа при 600°С (зниження на 42%); на базі 100 h – відповідно 245; 175 і 140 МПа (зниження на 43%).

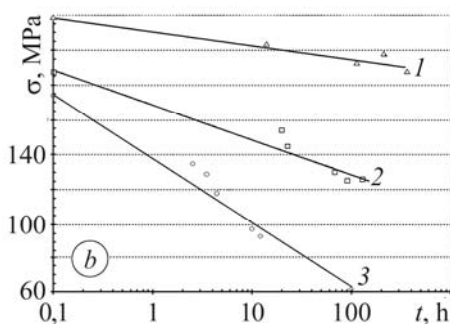
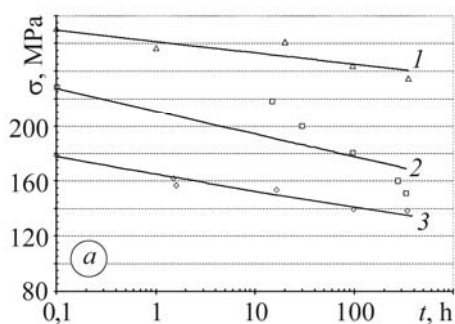
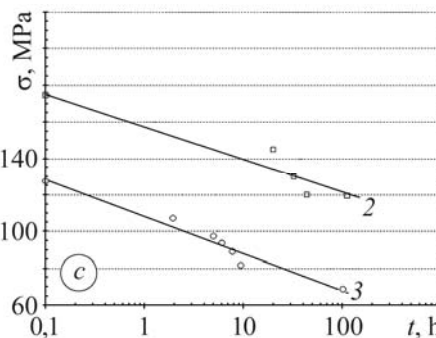


Рис. 1. Залежність довготривалої міцності сталі AISI 409L у вакуумі (a), розплавах свинцю (b) та евтектики Pb–Bi (c) за температур 500°С (1); 550°С (2) і 600°С (3) від часу випробувань.

Fig. 1. Dependence of long-term strength of steel AISI 409L in vacuum (a), lead (b) and lead–bismuth (c) melts at 500°С (1), 550°С (2) and 600°С (3) versus testing time.



Аналіз поверхонь свідчить, що руйнування відбувається за в'язким механізмом (рис. 2a, b). Видно численні деформаційні гребені і ямки за практично від-

сутніх крихких фасеток відколу. Розміри чашок, які характеризують ступінь інтенсивного пластичного деформування, достатньо великі. Чашки на поверхні в'язкого зламу є результатом утворення, росту та об'єднання багатьох мікропор (або мікротріщин) [8]. На поверхні зруйнованих стінок, а також на дні ямок видно лінії ковзання.

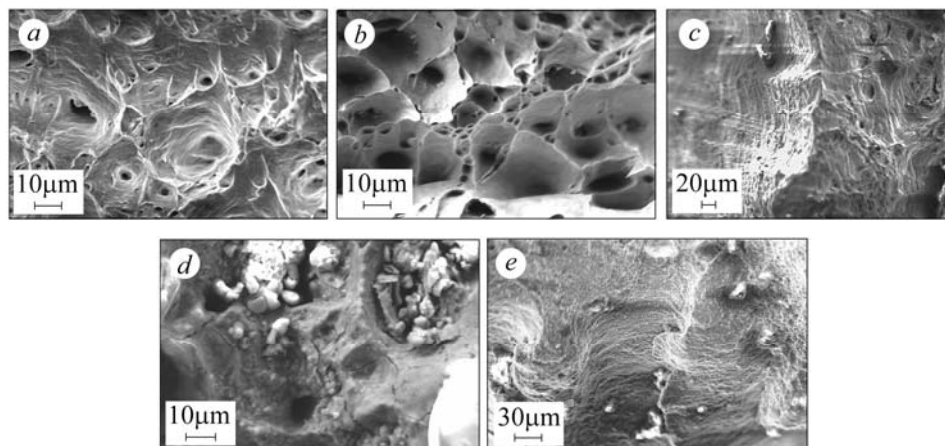


Рис. 2. Мікрофрактограми зразків сталі AISI 409L після руйнування у вакуумі при 500°C і напруженнях 257 МПа (а) та при 550°C і напруженнях 218 МПа (b); в розплаві свинцю при 500°C і напруженнях 198 МПа (c) та при 550°C і напруженнях 200 МПа (d); в розплаві свинець–вісмут при 550°C і напруженнях 181 МПа (e).

Fig. 2. SEM of fracture surfaces of steel AISI 409L after long-term strength tests in vacuum at 500°C and stresses 257 MPa (a) and at 550°C and 218 MPa (b); in lead melt at 500°C and 198 MPa (c), and at 550°C and 200 MPa (d); in lead–bismuth melt at 550°C and stresses 181 MPa (e).

Руйнування у свинці. Як і за випробувань у вакуумі, зі збільшенням тривалості випроб у свинці та температури границі довготривалої міцності сталі зменшуються (див. рис. 1b). Зокрема, на базі 10 h вони становили 205 МПа при 500°C, 150 МПа при 550°C і 105 МПа при 600°C (зниження на 49%); на базі 100 h – відповідно 190; 130 і 70 МПа (зниження на 63%).

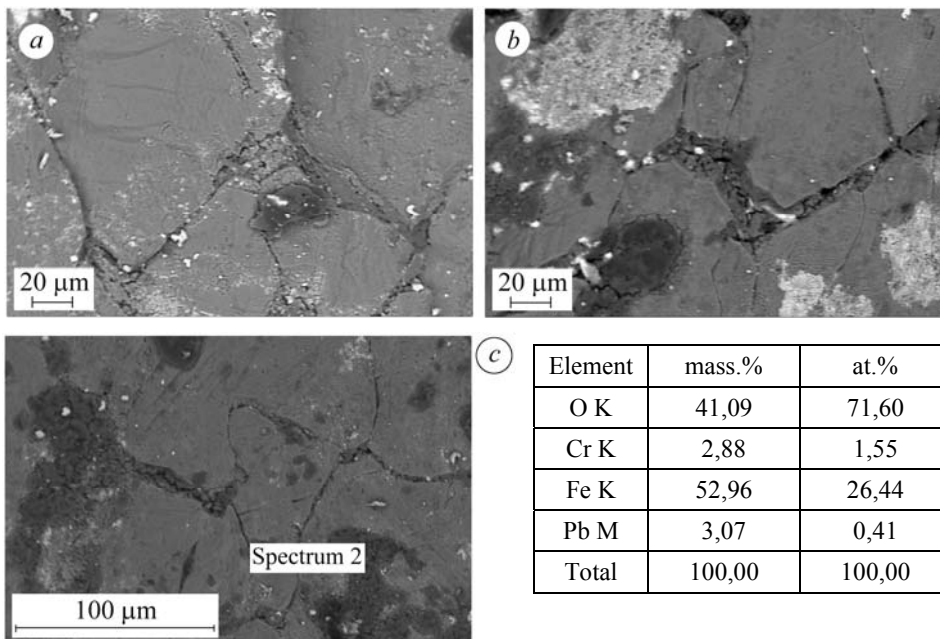
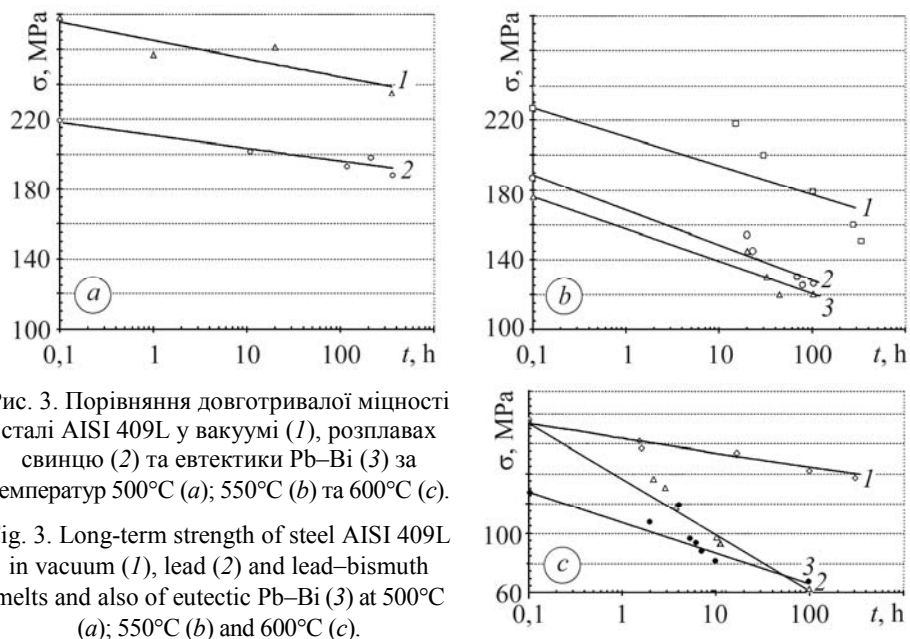
На поверхні руйнування за температури 500°C зафіксовано мережу в'язких гребенів та ямок (рис. 2c). На дні ямок помітні лінії ковзання, які утворилися за пластичного деформування зразків перед руйнуванням. Водночас чітко проявляються зони з відкольними фасетками (рис. 2d). Крім цього, на поверхні зламу простежуються вторинні тріщини (рис. 2d). Це свідчить про змінюваний в'язко-крихкий механізм руйнування за цих умов.

Руйнування в евтектиці свинець–вісмут. Як і в попередніх випадках, зі збільшенням тривалості випробувань у Pb–Bi та температури від 500 до 600°C довготривала міцність сталі зменшується (див. рис. 1c) майже удвічі на базі 10 і 100 h – від 120 до 65 МПа.

Фрактографічний аналіз свідчить, що руйнування відбувається за в'язким механізмом з утворенням деформаційних гребенів і ямок. При цьому зафіксовано лише поодинокі фасетки відколу (рис. 2e).

Порівняння довготривалої міцності у різних середовищах (рис. 3) показує, що порівняно з вакуумом свинцеві розплави в 1,3–2 рази знижують опірність сталі AISI 409L тривалому статичному навантаженню в діапазоні температур 500... 600°C. З підвищенням температури (до 600°C) проявляються деякі відмінності у

впливі свинцю та евтектики свинець–вісмут залежно від бази випробувань: у розплаві евтектики зниження довготривалої міцності суттєвіше, ніж у свинці.



Пояснити зниження довготривалої міцності матеріалу в свинцевих розплавах допомагає аналіз мікроструктури металу і локального вмісту хімічних елементів у деформованій ділянці зразка, який витримували в евтектиці під статичним навантаженням при 600°C, не руйнуючи його. Встановлено, що окрихчу-

вальна дія свинцевих розплавів полегшує зародження міжзеренних тріщин у приповерхневих шарах зразка (рис. 4a, b), а результатом корозійної дії є селективне розчинення хрому, що знижує енергію зв'язку на межах зерен, де внаслідок взаємодії заліза з присутнім у розплаві киснем пришвидшується утворення оксидів на базі заліза. Локальний хімічний аналіз підтвердив, що темні утворення біля меж зерен – оксиди заліза, причому вміст хрому в цій області мінімальний (рис. 4c). Саме тут відбувається тріщиноутворення, що полегшує деформацію і, відповідно, зменшує час до руйнування.

ВИСНОВКИ

Розплави свинцю та евтектики свинець–вісмут знижують у 1,3–2 рази довготривалу міцність феритної сталі AISI 409L (Fe–11Cr) в інтервалі температур 500...600°C порівняно з вакуумом. З підвищенням температури негативний вплив евтектики зростає. Однією з причин зниження опірності сталі руйнуванню є корозійна дія свинцю і евтектики, а саме процеси, які відбуваються вздовж меж зерен: селективне розчинення хрому та утворення оксидів на основі заліза, які окрихчуються під навантаженням, що полегшує руйнування матеріалу.

РЕЗЮМЕ. Исследованы закономерности влияния расплавов свинца и эвтектики свинец–висмут на длительную прочность стали ферритного класса AISI 409L (Fe–11Cr) в температурном интервале 500...600°C. Установлено, что они снижают сопротивление стали длительным статическим нагрузкам в сравнении с вакуумной средой. С повышением температуры негативное влияние эвтектики возрастает в результате коррозионного воздействия свинцовых расплавов, а именно селективного растворения хрома вдоль границ зерен и формирования оксидов на основе железа, которые быстрее охрупчиваются под напряжением, облегчая разрушение материала.

SUMMARY. The regularities of the influence of lead and lead–bismuth eutectic melts on the long-term strength of ferritic steel AISI 409L (Fe–11Cr) in the temperature range 500...600°C were investigated. It was established that lead and eutectic melts reduce the resistance of steel to static loads as compared to vacuum. The negative impact of the eutectic increases with temperature rising. One of the reasons of the delayed fracture resistance of steel under long-term static loading in lead is corrosive activity of lead and eutectic, namely the selective dissolution of chromium along the grain boundaries and the formation of iron oxides that embrittle rapidly under loading, facilitating material fracture.

1. *Comparative assessment of thermophysical and thermohydraulic characteristics of lead, lead-bismuth and sodium coolants for fast reactors // IAEA-TECDOC-1289. – Vienna, 2002. – 72 p.*
2. *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. – Idaho, 2001. – P. 181–223.*
3. *Thermalhydraulic and corrosion challenges for the target module of an accelerator-driven system (ADS) / J. U. Knebel, X. Cheng, G. Muller et al. // Third international topical meeting on nuclear application of accelerator technology AccApp'99, November 14–18. – Long Beach CA, 1999. – P. 367–376.*
4. *Ehrlich K., Bloom E. E., and Kondo T. International strategy for fusion materials development // JNM. – 2000. – 283–287. – P. 79–88.*
5. *Ehrlich K. Materials research towards a fusion reactor // Fusion Eng. and Design. – 2001. – 56. – P. 71–82.*
6. *Попович В. В. Механизмы жидкометаллического охрупчивания // Физ.-хим. механіка матеріалів. – 1979. – № 5. – С. 11–20.*
7. *Corrosion of ODS steels in lead–bismuth eutectic / P. Hosemann, H. T. Thau, A. L. Johnson et al. // J. of Nuclear Materials. – 2008. – 373. – P. 246–253.*
8. *Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 350 с.*

Одержано 12.05.2014