

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.101.15

ОБРАЗОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОДШИПНИКОВЫХ СТАЛЯХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

ГУБЕНКО С.И., *д.т.н, проф.*

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

Аннотация. *Цель.* Проблема влияния неметаллических включений на коррозионное разрушение сталей является актуальной. Целью работы было исследовать влияние типов неметаллических включений на уровень их активности в зарождении коррозионных повреждений и механические свойства подшипниковых сталей. *Методика.* Применяли ускоренные методы коррозионных испытаний сталей ШХ15 и ШХ15СГ специально полученных плавков, программно загрязненных различными типами неметаллических включений. Проводили испытания на малоцикловую усталость на воздухе и в различных коррозионных средах. Применяли ускоренный метод испытаний склонности сталей к коррозионному растрескиванию, а также на усталостную прочность. *Результаты.* Установлено, что коррозионные повреждения в подшипниковых сталях возникают вблизи неметаллических включений различных типов. Показано влияние включений на малоцикловую усталость и коррозионное растрескивание на воздухе и в различных коррозионных средах. Установлен и обоснован последовательный убывающий ряд, показывающий степень вредного влияния включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в подшипниковых сталях. Обосновано самое вредное влияние сульфидов на стойкость подшипниковых сталей в агрессивных средах. *Научная новизна.* Установлены особенности влияния различных типов неметаллических включений на коррозионное разрушение подшипниковых сталей. Установлен и обоснован последовательный убывающий ряд, показывающий степень вредного влияния включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в подшипниковых сталях. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволило разработать технологии электроплавки подшипниковых сталей с регламентированным содержанием и видами неметаллических включений, что позволит существенно повысить их коррозионную стойкость.

Ключевые слова: коррозия, подшипниковая сталь, неметаллические включения.

УТВОРЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В ПІДШИПНИКОВИХ СТАЛЯХ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

ГУБЕНКО С.І., *д.т.н, проф.*

Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

Анотація. *Мета.* Проблема впливу неметалевих включень на корозійне руйнування сталей є актуальною. Метою роботи було дослідити вплив типів неметалевих включень на рівень їх активності в зародженні корозійних пошкоджень і механічні властивості підшипникових сталей. *Методика.* Застосовували прискорені методи корозійних випробувань сталей ШХ15 і ШХ15СГ спеціально отриманих плавків, які були програмно забруднені різними типами неметалевих включень. Проводили випробування на малоциклову утому на повітрі і в різних корозійних середовищах. Застосовували прискорений метод випробувань схильності сталей до корозійного розтріскування, а також на міцність від утоми. *Результати.* Встановлено, що корозійні пошкодження в підшипникових сталях виникають поблизу неметалевих включень різних типів. Показано вплив включень на малоциклову утому і корозійне розтріскування на повітрі і в різних корозійних середовищах. Встановлено і обґрунтовано послідовний регресний ряд, який покаже ступінь шкідливого впливу включень на зародження і розвиток корозійних пошкоджень в підшипникових сталях. Обґрунтовано саме шкідливий вплив сульфідів на стійкість підшипникових сталей в агресивних середовищах. *Наукова новизна.* Встановлено особливості впливу різних типів неметалевих включень на корозійне руйнування підшипникових сталей. Встановлено і обґрунтовано послідовний регресний ряд, який покаже ступінь шкідливого впливу включень на зародження і розвиток корозійних пошкоджень в підшипникових сталях. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволило розробити технології електроплавки підшипникових сталей з регламентованим змістом і видами неметалевих включень, що дозволить істотно підвищити їх корозійну стійкість.

Ключові слова: корозія, підшипникова сталь, неметалеві включення.

FORMATION OF DAMAGES IN BEARING STEELS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

GUBENKO S.I., DR. SC. (TECH.), PROF.

Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnepr, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

Abstract. Purpose. The problem of influence of nonmetallic inclusions on the corrosion destruction of steels is actual. The goal of the work was to investigate the influence of the types of nonmetallic inclusions on their activity level in the origin of corrosion damage and the mechanical properties of bearing steels. **Methods.** Accelerated methods of corrosion testing of steels SHCH15 and SHCH15SG of specially obtained fusions, program contaminated with various types of nonmetallic inclusions, were used. Low fatigue tests were carried out in the air and in the various corrosive environments. An accelerated method was used to test the propensity of steels to stress corrosion cracking, as well as fatigue strength. **Results.** It was established that corrosion damages in bearing steels occur near nonmetallic inclusions of various types. The influence of non-metallic inclusions on the low-cycle fatigue and corrosive cracking in the air and in the various corrosive environments was shown. A sequential decreasing series has been established and justified, showing the degree of harmful influence of inclusions on the nucleation and development of corrosion damage in bearing steels. The most harmful effect of sulphides on the resistance of bearing steels in corrosive environments is substantiated. **Scientific novelty.** The peculiarities of the influence of various types of nonmetallic inclusions on the corrosion destruction of bearing steels have been established. A sequential decreasing series has been established and justified, showing the degree of harmful influence of inclusions on the nucleation and development of corrosion damage in bearing steels. **Practical significance.** The use of the obtained results allowed to develop technologies for electric melting of bearing steels with regulated content and types of nonmetallic inclusions, which will significantly increase their corrosion resistance.

Keywords: corrosion, bearing steel, nonmetallic inclusions.

Введение

Коррозионное разрушение подшипниковых сталей происходит при одновременном воздействии атмосферы, содержащей влагу, кислотные газы, соли, а также напряжений от динамических нагрузок и в статических условиях. Известно, что неметаллические включения являются центрами образования очагов коррозии в углеродистых и легированных сталях [1-3, 5-7, 9].

Цель

Целью работы было исследовать влияние типов неметаллических включений на уровень их активности в зарождении коррозионных повреждений и механические свойства подшипниковых сталей.

Материалы и методики

Применяли ускоренные методы коррозионных испытаний, позволяющие короткое время вызвать очевидное разрушение сталей ШХ15 и ШХ15СГ специально полученных плавков, программно загрязненных различными типами неметаллических включений: пл. 1 – сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS, пл. 2 – корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO-Al_2O_3$, $MnO-Al_2O_3$, $(Mn,Mg)O-Cr_2O_3$, л. 3 – SiO_2 , $MnO-SiO_2$, $FeO-SiO_2$, пл.4 – TiCN (примерно 0,5% об.). Испытания на малоцикловую усталость проводили на воздухе и в коррозионных средах, представляющих собой 5%-ный водный раствор NaCl (среда 1) и 1%-ный водный раствор H_2SO_4 (среда 2). Выбор коррозионных сред был обусловлен, тем, что они в определенной степени имитировали среды, в которых работают

изделия из этих сталей. Применяли ускоренный метод испытаний склонности сталей к коррозионному растрескиванию на установке ИМ-12. Испытания на усталостную прочность проводили на машине НУ при базе $N \cdot 10^6$ циклов нагружений.

Результаты исследования и их обсуждение.

В процессе развития коррозионных повреждений в поверхностных слоях изделий формируются оксидные фазы, которые проникают на значительную глубину и являются концентраторами напряжений, что существенно влияет на надежность и долговечность подшипников при эксплуатации. При испытаниях на малоцикловую усталость на воздухе сталей ШХ15 и ШХ15СГ опытных плавков наблюдается влияние типа неметаллических включений на усталостные характеристики (табл. 31: самая низкая величина N получена для сталей, загрязненных сульфидами (пл. 1), затем она увеличивается при наличии соответственно корунда и шпинелей (пл. 2), силикатов (пл. 3) и, наконец, карбонитридов титана (пл. 4). Коррозионная среда привела к существенному снижению долговечности сталей при малоцикловой усталости, однако, тип включений существенно влияет на этот показатель: по мере увеличения долговечности при малоцикловой усталости опытные плавки выстроились в аналогичный возрастающий ряд: самая низкая величина N у стали, загрязненной сульфидами, затем она увеличивается при наличии соответственно корунда и шпинелей, силикатов и, наконец, карбонитридов титана.

Таблица 1.

Малоцикловая долговечность N стали ШХ15 на воздухе и в коррозионных средах, а также коэффициент влияния среды β_c в зависимости от типа неметаллических включений

среда	плавка, включения	$N \cdot 10^6$, циклов	β_c
воздух	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS	1,4	-
	пл.2, Al ₂ O ₃ , MgO·Al ₂ O ₃ , MnO·Al ₂ O ₃ , (Mn,Mg)O·Cr ₂ O ₃	1,9	-
	пл.3, SiO ₂ , MnO·SiO ₂ , FeO·SiO ₂	2,1	-
	пл.4, TiCN.	2,3	-
5%-ный водный раствор NaCl	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS,	0,7	2,0
	пл.2, Al ₂ O ₃ , MgO·Al ₂ O ₃ , MnO·Al ₂ O ₃ , (Mn,Mg)O·Cr ₂ O ₃	1,3	1,46
	пл.3, SiO ₂ , MnO·SiO ₂ , FeO·SiO ₂	1,5	1,40
	пл.4, TiCN.	1,7	1,35
1%-ный водный раствор H ₂ SO ₄	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS,	0,6	2,33
	пл.2, Al ₂ O ₃ , MgO·Al ₂ O ₃ , MnO·Al ₂ O ₃ , (Mn,Mg)O·Cr ₂ O ₃	1,2	1,58
	пл.3, SiO ₂ , MnO·SiO ₂ , FeO·SiO ₂	1,3	1,62
	пл.4, TiCN.	1,5	1,53

Определены коэффициенты влияния среды β_c , представляющие собой отношение долговечности стали на воздухе к аналогичному показателю в коррозионной среде (табл. 1). Очевидно, чем больше величина этого коэффициента, тем сильнее снижают неметаллические включения малоцикловую долговечность. Установлен убывающий ряд, показывающий степень вредного воздействия включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений: сульфиды (Fe, Mn) S, FeS-MnS → корунд и шпинели Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, MnO·Al₂O₃, (Mn,Mg)O·Cr₂O₃ → силикаты SiO₂, MnO·SiO₂, FeO·SiO₂ → карбонитриды титана TiCN.

Наличие неметаллических включений в стальной матрице способствует появлению коррозионных микроэлементов, что приводит к усилению электрохимической микрогетерогенности поверхности подшипников. Все изучаемые неметаллические включения являются катодами по отношению к стальной матрице. Оптимальным путем установлено, что по величине значений разностей

электродных потенциалов стали ШХ15 $\Delta\phi$ они располагаются в убывающий ряд: сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS, корунд и шпинели Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, MnO·Al₂O₃, (Mn,Mg)O·Cr₂O₃, силикаты SiO₂, MnO·SiO₂, FeO·SiO₂, карбонитрид титана TiCN.

Металлографические исследования сталей опытных плавок после испытаний на малоцикловую усталость в разных средах показали, что коррозионные повреждения зарождались на неметаллических включениях всех типов (рис. 1). Практически всегда процесс коррозии начинается на межфазных границах включение-матрица, в затем распространяется в стальную матрицу и в неметаллическое включение. Межфазные границы включение-матрица являются готовыми „каналами” для проникания атомов поверхностно активного вещества из окружающей среды, особенно в условия повышенных температур [4, 10 - 13].

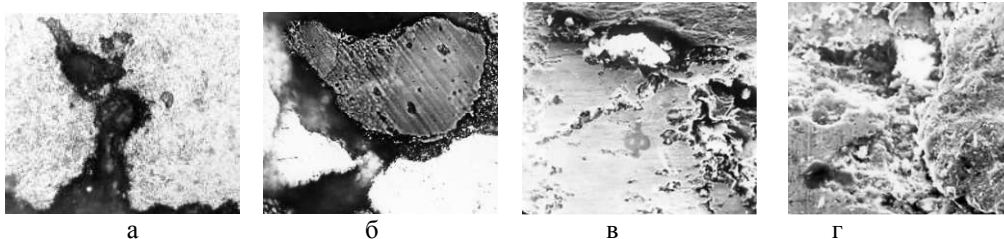


Рис. 1. Зарождение коррозионных повреждений на неметаллических включениях (Fe,Mn)S (а, з), MgO·Al₂O₃ (б), MnO·SiO₂ (в) в сталях ШХ15 (а - в) и ШХ15Г (з) после испытаний на малоцикловую усталость в 5%-ном водном растворе NaCl (а, в, з) и 1%-ном водном растворе H₂SO₄ (б): х600

Анализ результатов, приведенных в таблице 1, позволил условно разделить неметаллические включения на две группы. В первую группу входят сульфидные включения (Fe,Mn)S, FeS-MnS для которых коэффициент влияния среды β_c в 5%-ном водном растворе NaCl составляет 2,0, в 1%-ном водном растворе H₂SO₄ – 2,33. Во вторую группу

входят все остальные включения, а именно корунд и шпинели Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, MnO·Al₂O₃, (Mn,Mg)O·Cr₂O₃, силикаты SiO₂, MnO·SiO₂, FeO·SiO₂, карбонитрид титана TiCN, для которых величина β_c в среде 5%-ного водного раствора NaCl составляет 1,35...1,46, в среде 1%-ного водного раствора H₂SO₄ – 1,53...1,62. Для разных типов

изучаемых включений существуют такие равные условия, как содержание включений в стали, наличие межфазных границ включение-матрица, протекание адсорбционных процессов, а также различия в электропроводности и полупроводниковых свойствах включений, определяющие установленную выше последовательность степеней вредного влияния включений на зарождение коррозии. Однако следует учитывать фактор, связанный с наличием термических напряжений определенного знака вблизи включений.

Известен эффект влияния сжимающих напряжений на подавление адсорбционного эффекта [8]. Остаточные растягивающие напряжения усиливают адсорбционные и коррозионные усталостные явления, т. е. складываясь с действующими (внешними) циклическими растягивающими напряжениями, растягивающие напряжения вблизи неметаллических включений значительно увеличивают число „активных” ультрамикротрещин в стали. Расчеты и исследования термических напряжений показали [1 - 3], что только вблизи сульфидов они являются растягивающими, вблизи остальных изучаемых в данной работе включений – сжимающими. Исследовали влияние неметаллических включений на механические свойства подшипниковых сталей в активных средах.

Разрушение стали вследствие коррозионного растрескивания наиболее опасно, так как происходит внезапно (без заметной пластической деформации) при незначительной общей коррозии и напряжениях значительно ниже предела прочности. Скоростные испытания с целью определения склонности к коррозионному растрескиванию показали, что механические свойства сталей зависели от типа неметаллических включений при испытаниях на воздухе (табл. 2). Испытания в коррозионных средах привели к перераспределению относительного влияния типа включения на механические свойства колесной стали. Предел прочности стали σ_B , сопротивление отрыву S_K , характеристики пластичности δ и ψ наиболее значительно уменьшились для пл. 1 с сульфидами, для остальных видов включений это уменьшение менее значительно. При этом четко наметился убывающий ряд по влиянию типа включения на свойства стали: сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS, → корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn,Mg)O \cdot Cr_2O_3$ → силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$ → карбонитрид титана TiCN, что соответствует результатам, приведенным выше при оценке влияния включений на долговечности изучаемых сталей при малоциклового усталости.

Таблица 2.

Механические свойства стали ШХ15 с разными неметаллическими включениями после испытаний на растяжение в разных средах

среда	номер плавки, включения	свойства			
		S_K , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
воздух	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS	1196	1218	12,3	31,2
	пл.2, Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn,Mg)O \cdot Cr_2O_3$	1164	1135	10,8	28,5
	пл.3, SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1199	1122	10,4	32,6
	пл.4, TiCN	1124	1089	11,3	29,2
5%-ный водный раствор NaCl	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS,	1146	1109	9,1	26,1
	пл.2, Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn,Mg)O \cdot Cr_2O_3$	1195	1086	9,8	27,1
	пл.3, SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1145	1125	10,1	28,0
	пл.4, TiCN	1153	1121	10,1	28,2
1%-ный водный раствор H_2SO_4	пл.1, сульфиды (Fe,Mn)S, FeS-MnS,	952	1121	7,8	23,2
	пл.2, Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn,Mg)O \cdot Cr_2O_3$	1105	1172	8,1	25,2
	пл.3, SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1142	1243	9,2	26,1
	пл.4, TiCN	1159	1258	9,4	26,3

Выводы. Установлен и обоснован и развитие коррозионных повреждений в последовательный убывающий ряд, показывающий подшипниковых сталях. степень вредного влияния включений на зарождение

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Губенко С.И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей: монография / Губенко С.И. - Саарбрюкен (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. - 476 с.

2. Губенко С.И. Неметаллические включения в стали: монография / Губенко С.И., Ошкадеров С.П. - Киев: Наукова думка. 2016. - 528с.
3. Губенко С.И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей: монография / Губенко С.И. - Germany-Mauritius: Palmarium academic publishing, 2017. - 506 с.
4. Денисенко О.И. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О.И. Денисенко, В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т.9. – № 1 (2008). – С. 181-184.
5. Колотыркин Я.М. Роль неметаллических включений в коррозионных процессах. Коррозия и защита от коррозии. Сер. Итоги науки и техники / Колотыркин Я.М. Фрейман Л.И. М.: ВНИИТИ, 1978. - №6. - С. 3 – 52.
6. Котельников Г.И'. Расчетная оценка коррозионной активности неметаллических включений в трубной стали / Г.И. Котельников, Д.А. Мовенко, К.Л. Косырев, Р.С. Кулиш, С.А. Мотренко, А.В. Стонога // Электрометаллургия. 2011. - №2. - С. 36 – 39.
7. Куслицкий А.Б. Неметаллические включения и усталость стали: монография / Куслицкий А.Б. - К.: Техника, 1976. - 128с.
8. Лихтман В.И. Физико-химическая механика материалов: монография / Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А.. М.: изд. АН СССР, 1962. - 303с.
9. Родионова И.Г. О роли неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей / И.Г. Родионова, О.Н. Бакланова, А.И. Зайцев // Металлы. 2004. - №5. - С. 13 - 18.
10. Цоцко В.И. Температурные характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности. / Цоцко В.И., Денисенко А.И. // Вісник Дніпропетровського національного університету, 2004, №2: 72-
11. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование поля температур одномерного образца в условиях местной термоциклирующей обработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. – Том 10. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2007. – С. 170-178.
12. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (56). – Том 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22-29.
13. Цоцко В.И. Нестационарное поле температур в металле в условиях импульсного энергетического воздействия / В.И. Цоцко, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Сб. научн. тр.: Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 202-208.

REFERENCES

1. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. – Saarbrücken: LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I., Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. – Kiev: Naukova dumka. 2016, 528 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I. *Mezhfaznye granitsi vkluchenie-matritsa I svojsrva stalej* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. - Germany-Mauritius: Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
4. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila - Physics and Chemistry of Solid State*, 2008, v. 9, N1, p. 181-184 (in Ukrainian)
5. Kolotilkin Ja.M., Fraiman L.I. *Rol nemetallicheskih vkluchenij v korrosionnih protsessah. Corrosia I zachita ot korrosii*. [The role of nonmetallic inclusions in corrosion processes. Corrosion and corrosion protection]. – Moscow: VNITI. 1978, №6, p. 3 – 52. (in Russian).
6. Kotelnikov G.I., Movenko D.A., Kosirev K.L., Kulish R.S., Motrenko S.A., Stonoga A.V. *Raschetnaja otsenka korrosionnoj aktivnosti nemetallicheskih vkluchenij v rpubnoj stali* [Estimated evaluation of corrosion activity of nonmetallic inclusions in pipe steel]. – *Electrometallurgy*, 2011, №2, p. 36 – 39. (in Russian).
7. Kuslitskij A.B. *Nemetallicheskie vkluchenija i ustalost stali* [Non-metallic inclusions and fatigue of steel]. - Kiev: Technics. 1976, 128 p. (in Russian).
8. Lihtnam V.I., Zhukin E.D., Rebinder P.A. *Phiziko-himicheskaja mehanika materialov* [Physico-chemical mechanics of materials]. – Moscow: Academy of Sci., 1962, 230 p. (in Russian).
9. Rodionova I.G., Baklanova O.N., Zaitsev A.I. *O roli nemetallicheskih vkluchenij vuskorenii lokalnoj korrosii nephtepromislovih truboprovodov is uglepodistih I nizkolegированных stalej* [On the role of nonmetallic inclusions in accelerating the processes of local corrosion of oilfield pipelines from carbonaceous and low-alloy steels]. –

- Metals, 2004, №5, p. 13 - 18. (in Russian).
10. Tsotsko V.I., Denisenko A.I. Temperaturne karakteristiki poverhnostnogo sloja nizkouglerodistih stalej v uslovijah lineinogo nagreva poverhnosti [Temperature characteristics of the surface layer of low-carbon steels in terms of a linear surface heating]. Visnik Dnepropetrovskogo nacionalnogo universiteta – Messenger of Dnepropetrovsk national university. 2004, №2: 72-77. (in Russian).
 11. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. Suchasni problem metalurgii. Naukovi pratsi - Modern problems of metallurgy. Proceedings.Dnepropetrovsk: Sistemnie Tehnologii, 2007, v. 10, p. 170-178. (in Russian).
 12. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. Sistemnie tehnologii - System technologies. Regional Interuniversity collection of scientific papers. Dnepropetrovsk, 2008, issue 3 (56), v. 2, p. 22-29 (in Russian).
 13. Tsotsko V.I., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Nestatsionarnoe pole temperature v metalle v uslovijah impulsnogo energeticheskogo vozdeistvija [Steady temperature field in the metal under the conditions of pulsed energy impact]. Sb.nauch. trudov: Visokoenergeticheskaja obrabotka materialov – High-energy treatment of materials. Dnepropetrovsk, ART-PRESS, 2009, p. 202-208. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.И. Большаковым (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухиным (Україна)