

Н. Ю. Філоненко¹, д.ф.-м.н, с.н.с., ORCID 0000-0003-1219-348X

О. І. Бабаченко¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4710-0343

Г. А. Кононенко², д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

² *ТОВ «Адитивні лазерні технології України»*

ВПЛИВ МІКРОЛЕГУВАННЯ ТИТАНОМ, АЛЮМІНІЄМ ТА АЗОТОМ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Анотація. Метою даної роботи було дослідити вплив мікролегування титаном, азотом та алюмінієм на комплекс механічних властивостей вуглецевих сталей з підвищеним вмістом марганцю та кремнію. Це пов'язано з тим, що в сучасних умовах розвитку техніки необхідні сталі з поліпшеними механічними та експлуатаційними властивостями. Дослідження були побудовані на порівнянні механічних властивостей відомих сталей марок 2, Т, дослідно промислової сталі марки К та сталей мікролегованих комплексами – алюміній, титан та азот; алюміній та азот на основі сталі марки К. Застосовували металографічний аналіз, визначення механічних властивостей, хімічний та мікрорентгеноспектральний аналізи. Показано, що комплексне мікролегування алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм, та азотом сталі марки К сприяє утворенню більш дрібнозернистої структури перліту та включень, у порівнянні зі сталями марок 2, Т та К. В структурі сталі марки К, яка мікролегована алюмінієм, титаном та азотом після лиття спостерігається утворення оксидів, нітридів, карбонітридів та багатшарових включень, які розташовані на границях зерен та в об'ємі зерна. Після повного циклу деформаційно-термічної обробки в структурі сталі залишаються карбіди, нітриди та карбонітриди титану. А в сталі на базі марки К, яка додатково мікролегована алюмінієм та азотом, після затвердіння відбувається утворення дрібнозернистої структури зі збільшеною об'ємною часткою перліту, утворення включень: оксидів, моносиліцидів марганцю та заліза; сульфідів та складних карбідів у порівнянні з відомими сталями марок К, 2 та Т. За результатами досліджень пропонується сталь К2, що забезпечує високий комплекс механічних властивостей після прискороного охолодження з середньою швидкістю охолодження 11,0 °C/c від температури 850±10 °C та наступного відпуску при температурі 550±10 °C протягом 2 годин за рахунок збільшення дисперсності ферито-перлітної структури, що зміцнена дисперсними включеннями, у порівнянні зі сталлю К1. В сталі К2, показники міцності, твердості та ударної в'язкості на 10–15 % вищі за ті ж показники для сталі К1.

Ключові слова: мікроструктура, механічні випробування, сталі марок 2, Т, К, мікролегування алюмінієм, титаном, азотом.

Посилання для цитування: Філоненко Н. Ю, Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Вплив мікролегування титаном, алюмінієм та азотом вуглецевої сталі на особливості структури та механічні властивості. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 522-533. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-522-533>

Стан питання. Сучасний етап розвитку техніки потребує розробки вуглецевих сталей з підвищеним комплексом механічних та експлуатаційних властивостей [1].

Як відомо, на механічні та експлуатаційні характеристики сталі мають значний вплив особливості структури: дисперсність, розміри, морфологія, об'ємна частка та розподіл включень. Існує низка відомих методів впливу на механічні та експлуатаційні характеристики сталей перлітного класу: визначення оптимального вмісту базових хімічних елементів в сталі, використання мікролегування та інше.

Промислові вуглецеві сталі з підвищеним вмістом марганцю та кремнію мають застосування в промисловості [2]. Як відомо, кремній та алюміній мають вищу спорідненість до кисню, ніж Cr і Mn, тому вони більше впливають на утворення оксидів в сплавах [2]. Дослідження сталей з малим вмістом вуглецю – 0,01 % (мас.), марганцю – 1,45 (мас.), кремнію – 0,6 % (мас.), алюмінію – 0,02-0,16 % (мас.), азоту – 0,005 % (мас.) після нагріву та прокатки при температурі 1200°C показали, що легування алюмінієм призвело до утворення більш дрібних зерен фериту, утворення включень MnS та AlN та збільшення опору динамічним навантаженням [3].

Відомо, що додавання кремнію в сталь може значно збільшити міцність та покращити ударну в'язкість сталі, головним чином завдяки утворенню фаз, що містять кремній по границях зерен, а зі збільшенням вмісту Mn, міцність сталей збільшується, але це збільшення відбувається відносно повільно [4].

Дослідження, представлені в роботі [4] показали, що в сплаві $Al_2O_3-Ti_2O_3-TiO_2$ можливе утворення не тільки оксиду заліза, а й метастабільної фази Al_2TiO_5 , а автори роботи [5] показали, що в сплавах системи Al-Fe-O можливе утворення оксидів алюмінію $FeAl_2O_4$ та $FeAlO_3$.

Після деформації сталі Fe-0,2C-1,44Si-1,32Mn зі ступенем 52 % при температурі 1150 °C, з поетапним охолодженням та витримкою при температурах 820 °C, 680 °C та 380 °C видовження зразків може досягати 41 %, гранична міцність може досягати 677 МПа [6].

Автори роботи [7] дослідили механічні властивості сталі Fe-0,2C-0,21Si-1,1Mn-0,35Cr-0,026Ti-0,0038N та зробили оцінку різних чинників на плинність сталі. Сталь мала границю плинності 585,6 МПа, границю міцності – 670,0 МПа та відносне видовження до 30 % [7].

Автори роботи показали [8] слабку взаємодію між Mn і Ti та сильний зв'язок між Si і Ti, утворення в сталі первинної фази Ti(C,N).

Вплив титану полягає в подрібненні зерна фериту середньовуглецевої сталі за рахунок утворення фази TiC та зменшення розчинності в аустеніті при зниженні температури [8]. Дослідження впливу титану та азоту при мікрорегуванні вуглецевих сталей показали [9-10], що титан має більшу спорідненість з азотом. Це сприяє утворенню нітридів титану TiN в розплаві та для утворення цієї фази необхідний вміст титану повинен бути більший за 0,014 % (мас.)

Таким чином, регулюючи вміст марганцю, кремнію, титану, алюмінію та азоту в сталі можна досягати необхідних показників механічних властивостей сталей, шляхом впливу на розміри зерен, фазовий склад та дисперсність фаз.

Мета роботи: дослідити вплив мікрорегування титаном, азотом та алюмінієм на комплекс механічних властивостей вуглецевих сталей з підвищеним вмістом марганцю та кремнію.

Матеріали та методики: металографічний аналіз, визначення механічних властивостей, хімічний аналіз.

Матеріалом для досліджень були зразки сталей марок: 2, Т, К (дослідно-промислова сталь), сталь марки К додатково мікрорегуована алюмінієм, титаном та азотом (умовне позначення К1); та сталь марки К мікрорегуована алюмінієм та азотом (умовне позначення К2) (табл. 1).

Таблиця 1 – Вміст хімічних елементів в дослідній сталі.

Умовне позначення марки сталі	Масова частка елементів, % мас.									
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	V	Ti	(N)
2	0,55-0,63	0,22-0,45	0,50-0,90	≤0,030	≤0,025	-	-	≤0,10	-	-
T	0,62-0,70	0,22-0,65	0,50-1,00	≤0,030	0,005-0,025	-		≤0,15	-	-
K	0,57-0,60	0,85-1,05	0,70-0,85	0,012	0,004	0,015	0,021	0,130	≤0,005	0,004
K1	0,55-0,60	0,80-0,90	0,77-0,90	0,013	0,005	0,006	0,026	≤0,005	0,022	0,018
K2	0,55-0,60	0,80-0,90	0,77-0,90	0,010	0,004	0,007	0,12	≤0,005	≤0,005	0,018

Виплавку сталей дослідно-промислової марки К, сталей К1 та К2 в лабораторних умовах проводили за допомогою комплексної установки, що складається з плавильного агрегату ІПЕ-0,01 закритого типу і височастотного джерела струму ВТГ-20-22, що має вбудовану

станцію автономного охолодження.

Гаряче пластичне деформування (ГПД) проб було проведено після нагрівання до температури $(1260 \pm 10)^\circ\text{C}$ і витримки протягом 2 годин, зі ступенем деформації $\sim 50\%$ та охолодженням на спокійному повітрі до кімнатної температури.

З деформованих зливоків вирізали заготовки зразків, які в лабораторних умовах були термічно оброблені за різними режимами. Режими ТО зразків були наближені до умов охолодження: швидкість охолодження ($V_{\text{охол.}}$) – $(1,5 \dots 12)^\circ\text{C}/\text{с}$ від температури аустенізації $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$. Після охолодження проводили відпуск при $(500 \dots 600)^\circ\text{C}$ тривалістю 2 години.

Заміри твердості проводили на твердомірі ТК-2М. Визначення ударної в'язкості проводили з використанням маятникового копра PSW-30.

Для визначення хімічного складу сплаву використовували хімічний та спектральний аналіз. Дослідження виконані за допомогою оптичного мікроскопа «Неофот-21». Основні результати мікрорентгеноспектрального аналізу отримані за допомогою електронного мікроскопа JSM-6490 зі скануючою приставкою ASID-4D й енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізатора «Link Systems 860» із програмним забезпеченням. Рентгеноструктурний аналіз здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому Fe-K_α випромінюванні.

Результати. Мікроструктура сталі марки Т в литому стані була представлена перлітом та феритом. Перліт мав дрібнодисперсну морфологію (рис. 1, а).

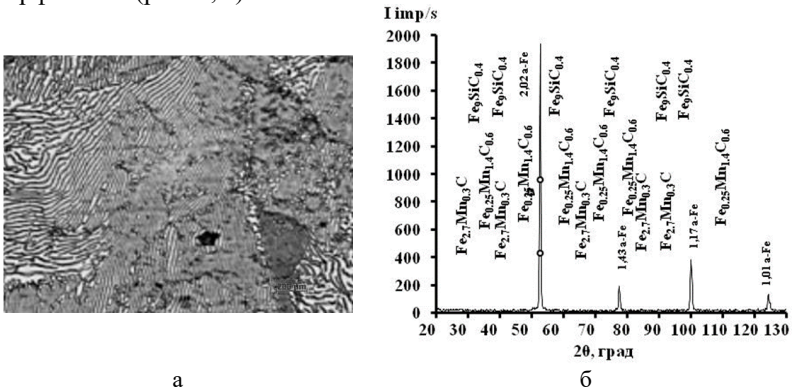


Рисунок – 1 Мікроструктура (а) та дифрактограма (б) сталі марки Т.

В структурі сталі марки Т виявлено включення, об'ємна частка яких складає 3%. У сталі марки Т були виявлені карбіди $\text{Fe}_{2,7}\text{Mn}_{0,3}\text{C}$, $\text{Fe}_{2,5}\text{Mn}_{1,4}\text{C}_{0,6}$ та $\text{Fe}_9\text{SiC}_{0,4}$ (рис. 1, б).

Аналіз результатів рентгеноструктурного аналізу показав, що у зразку сталі марки 2 присутні фази: ферит, карбід – $\text{Fe}_{2,7}\text{Mn}_{0,3}\text{C}$, карбід Fe_3C та фаза $\text{Fe}_{0,6}\text{Mn}_{6,4}\text{Si}_2$ (рис. 2).

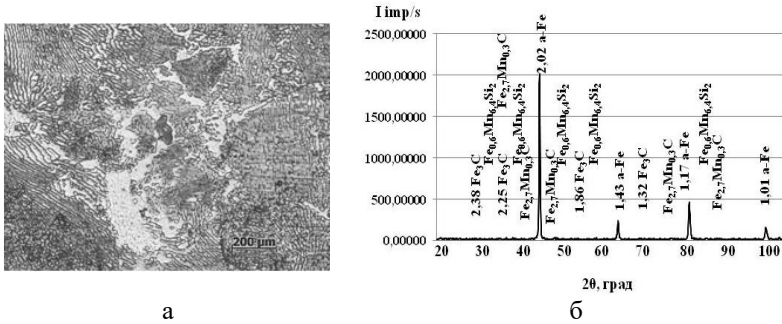


Рисунок 2 – Мікроструктура ($\times 1000$) та дифрактограма зразків сталі марки 2.

Мікроструктура сталі марки К представлена феритом і високодисперсним перлітом (рис. 3, а). Аналіз результатів рентгенофазового аналізу показав, що в цій сталі присутні фази: ферит, фаза - FeMn_4 , карбіди – Fe_3C та $\text{Fe}_{2,7}\text{Mn}_{0,3}\text{C}$ (рис. 3, б).

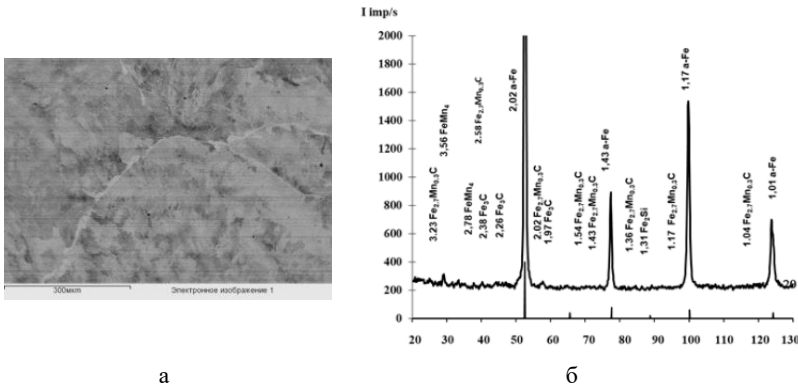
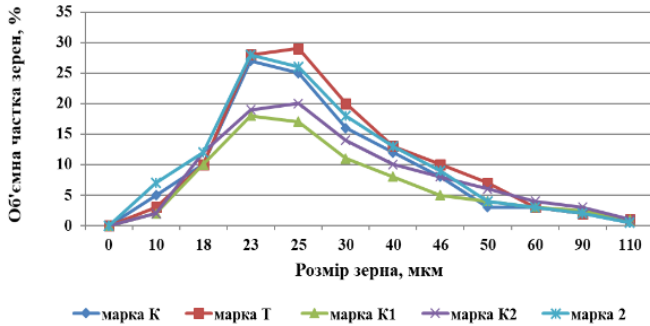


Рисунок 3 – Мікроструктура ($\times 1000$) та дифрактограма зразків сталі марки К.

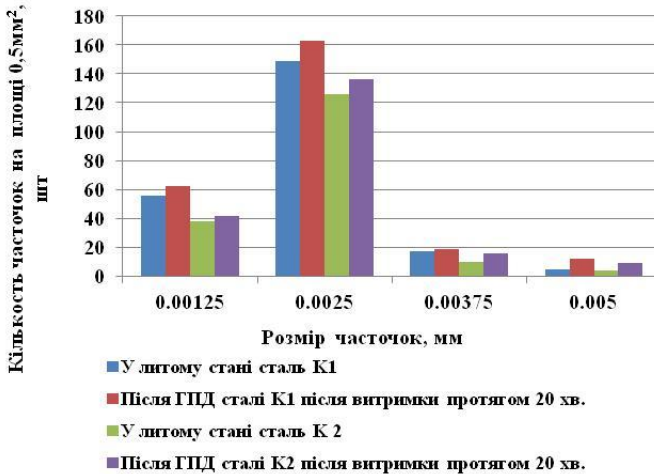
По границях зерен сталі марки К спостерігали утворення фериту у вигляді тонкої сітки, але також окремих включень структурно-вільного фериту об'ємі зерен.

У сталі K2, об'ємна частка фериту зменшується та ферит виділяється у вигляді тонких, не суцільних прошарків по границях зерен у порівнянні зі сталями марки 2, Т та К. За результатами рентгенофазового аналізу в сталі K2 присутні фази: оксиди – Al_2O_3 ,

впливом титану на розчинність вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових [11]. Мікролегування дослідно-промислової сталі марки К комплексами: алюмінієм, титаном, азотом; алюмінієм та азотом призводить до зменшення об'ємної частки фериту та збільшення об'ємної частки перліту з меншим розміром зерна після лиття, у порівнянні зі структурними складовими сталей марок Т та К без додаткового легування (рис. 6).



а



б

Рисунок 6 – Залежність об'ємної частки зерен досліджуваних сталей від їх розмірів (а) та кількісний аналіз зміни включень в дослідній сталі марки К1 та К2 у литому стані та після витримки при 1260°C протягом 20 хвилин.

Високотемпературна витримка при 1260 °С протягом 20 та 120 хвилин не сприяє суттєвому збільшенню розмірів та кількості неметалевих включень (рис. 6, б). При двох типах легування К2 та К1 спостерігали зменшення об'ємної частки структурно-вільного фериту, у порівнянні зі сталями 2, Т та К.

Після повного циклу деформаційно-термічної обробки не спостерігали в сталі К1 багатошарових включень [12-14]. Утворення дрібнодисперсних включень у результаті деформаційної і термічної обробки сталі К1 та К2 порівняно зі сталями марок К, 2 та Т призвело до збільшення пластичності та твердості сталі (табл. 2).

Таблиця 2 – Механічні властивості дослідних сталей після ГПД та ТО.

Умовне позначення марки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ , %	δ , %	КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	Твердість, НВ
К	937	1146	19,75	11,1	51,9	316
Т	842	1147	32,2	12,5	47,5	339
К2	698	1018	40,2	5,4	46,9	308
К1	617	997	50,1	18,4	46,7	299

Таким чином, виконано розробку хімічного складу і режимів термічної обробки сталей залізничного призначення з підвищеною стійкістю до зношування при підвищених навантаженнях та складних умовах гальмування. Отримані результати показали, що мікрولةгування дослідно-промислової сталі марки К комплексом – алюмінії та азот не призводить до утворення багатошарових включень, дає змогу підвищити весь комплекс службових та експлуатаційних властивостей сталей більше ніж при системі мікрولةгування – титаном, азотом та алюмінієм.

Висновки

1. Комплексне мікрولةгування алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм та азотом сталі марки К призводить до утворення більш дрібнозернистої структури та збільшення об'ємної частки перліту у порівнянні зі сталями марок 2, Т та К.

2. В сталях, які додатково мікрولةговані алюмінієм та азотом, після затвердіння відбувається утворення дрібнозернистої структури зі збільшеною об'ємною часткою перліту у порівнянні з відомими сталями марок К, 2 та Т. Спостерігали утворення включень: оксидів, моносиліцидів марганцю та заліза; сульфідів та складних карбідів.

3. В структурі сталі марки К мікрولةгованої алюмінієм, титаном та азотом після лиття спостерігається утворення оксидів, нітридів, карбонітридів та багатошарових включень, які розташовані на границях зерен та в об'ємі зерна. Встановлено, що багатошарові включення

мають розміри 2–5 мкм, після повного циклу деформаційно-термічної обробки в структурі сталі залишаються карбіди, нітриди та карбонітриди титану.

4. Запропоновано сталь K2, що забезпечує високий комплекс механічних властивостей після прискореного охолодження з середньою швидкістю охолодження 11,0 °C/с від температури 850±10 °C та наступного відпуску при температурі 550±10 °C протягом 2 годин за рахунок збільшення дисперсності ферито-перлітної структури, що зміцнена дисперсними включеннями, у порівнянні зі сталлю K1.

5. Встановлено, що додаткове мікролегування сталей алюмінієм та азотом збільшує показники ударної в'язкості та пластичності за рахунок зменшення розмірів зерна, дисперсності включень. В сталі K2, показники міцності, твердості та ударної в'язкості на 10–15 % вищі за ті ж показники для сталі K1.

Перелік посилань

1. Influence of the contents of chemical elements and the procedure of deformation and heat treatment on the formation of phase composition of wheel steel / N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, O. A. Safronova // *Materials Science*. 2022. Vol. 58, № 2. P. 190–195.
2. Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite / Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, J. Jiang // *Materials Science and Technology*. 2018. Vol. 34. № 7. P. 780–785.
3. Mintz B., Qaban A., Naher S. The influence of Widmanstätten ferrite, martensite and grain boundary carbides on the strength and impact behaviour of high Al (0.2%) and Nb containing hot rolled steel. *JMADE*. 2020. Vol. 109. P. 108601.
4. Zhu Z., Liang Y. J. Modeling Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms. *Materials*. 2020. Vol. 13. № 23. P. 5316.
5. Jung I. H. Eriksson G., Wu P., Pelton A. Thermodynamic Modeling of the Al₂O₃-TiO₃-TiO₂ System and Its Applications to the Fe-Al-Ti-O Inclusion Diagram. *ISIJ International*. 2009. Vol. 49, No. 9. P. 1290–1297. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.49.1290>
6. Zi Z., Fu Z., Yan L. Effect of Thermomechanical Control Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Fe-0,2C-1,44Si-1,32Mn Hot Rolled TRIP Steel. *Journal of iron and steel research, International*. 2010. Vol. 17. № 7. P. 44–50.
7. A On the relationship microstructure/properties on yield strength of a Fe-C-Mn steel / Aburto-Perdomo E., Duran-Nucez1 A., Ramirez-Ledesma A. L., Juarez-Islas J. / *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1723. P. 012001.
8. The effects of alloying elements on the peritectic range of Fe-C-Mn-Si steels / Q. Ren, T. Liu, S. Baik, Z. Mao, B. W. Krakauer, D. N. Seidman // *Materials Science*. 2021. Vol. 56, P. 6448–6464.
9. Ghali S. N., El-Faramawy H. S., Eissa M. M. Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel. *Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2012. Vol. 11. P. 995–999.
10. El-Faramawy H. S., Ghali S. N., Eissa M. M. Effect of Titanium Addition on

Behavior of Medium Carbon Steel. *Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012. Vol. 11. P. 1108-1112.

11. Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in α -iron / N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, A. S. Baskevich // *East European Journal of Physics*. 2021. № 4. P. 120–123.

12. Філоненко Н. Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Дослідження впливу деформаційної та термічної обробки на фазовий склад сталі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. №6 (006). С. 75-82.

13. Філоненко Н. Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Дослідження морфології багатошарових включень в сплавах системи Fe-C-Mn-Si-Ti-Al-N. *Метал та лиття України*. 2022. Vol. 30, No. 3 (330). С. 81–87.

14. Філоненко Н. Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А. Математичне моделювання стійкості первинних фаз при кристалізації сплаву Fe-C-Mn-Si-Ti-Al-N. *Математичне моделювання*. 2021. № 2 (45). С. 103-113.

References

1. Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., Kononenko, G. A., & Safronova, O. A. (2022). Influence of the contents of chemical elements and the procedure of deformation and heat treatment on the formation of phase composition of wheel steel. *Materials Science*, 58(2), 190-195

2. Tu, Y., Huang, L., Zhang, Q., Zhou, X., & Jiang, J. (2018). Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite. *Materials Science and Technology*, 34(7), 780-785

3. Mintz, B., Qaban, A., & Naher, S. (2020). The influence of Widmanstätten ferrite, martensite and grain boundary carbides on the strength and impact behaviour of high Al (0.2%) and Nb containing hot rolled steel. *JMADE*, 109, 108601

4. Zhu, Z., & Liang, Y. J. (2020). Modeling Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms. *Materials*, 13(23), 5316

5. Jung, I. H., Eriksson, G., Wu, P., & Pelton, A. (2009). Thermodynamic Modeling of the Al₂O₃-Ti₂O₃-TiO₂ System and Its Applications to the Fe-Al-Ti-O Inclusion Diagram. *ISIJ International*, 49(9), 1290–1297. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.49.1290>

6. Zi, Z., Fu, Z., & Yan, L. (2010). Effect of Thermomechanical Control Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Fe-0.2C-1.44Si-1.32Mn Hot Rolled TRIP Steel. *Journal of iron and steel research, International*, 17(7), 44-50

7. Aburto-Perdomo, E., Duran-Nucez1, A., Ramirez-Ledesma, A. L., & Juarez-Islas, J. A. (2021). On the relationship microstructure/properties on yield strength of a Fe-C-Mn steel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1723, 012001

8. Ren, Q., Liu, T., Baik, S., Mao, Z., Krakauer, B. W., & Seidman, D. N. (2021). The effects of alloying elements on the peritectic range of Fe-C-Mn-Si steels. *Materials Science*, 56, 6448–6464

9. Ghali, S. N., El-Faramawy, H. S., & Eissa, M. M. (2012). Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel. *Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, 995-999

10. El-Faramawy, H. S., Ghali, S. N., & Eissa, M. M. (2012). Effect of Titanium

Addition on Behavior of Medium Carbon Steel. *Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, 1108-1112

11. Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., Kononenko, G. A., & Baskevich, A. S. (2021). Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in α -iron. *East European Journal of Physics*, (4), 120–123.

12. Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., & Kononenko, G. A. (2021). Doslidzhennia vplyvu deformatsiinoi ta termichnoi obrobky na fazovyi sklad stali. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (6), 75-82

13. Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., & Kononenko, G. A. (2022). Doslidzhennia morfolohii bahatosharovykh vkluchen v splavakh systemy Fe-C-Mn-Si-Ti-Al-N. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(3), 81–87

14. Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., & Kononenko, G. A. (2021). Matematychni modeliuvannya stiikosti pervynnykh faz pry krystalizatsii splavu Fe-C-Mn-Si-Ti-Al-N. *Mathematical modeling*, (2), 103-113

N. Yu. Filonenko¹, D. Sc. (Pys.-Math.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1219-348X

O. I. Babachenko¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4710-0343

G. A. Kononenko², D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

¹Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

²LLC "Additive laser technologies of Ukraine"

EFFECT OF MICROALLOYING OF CARBON STEEL WITH TITANIUM, ALUMINUM AND NITROGEN ON STRUCTURAL PECULIARITIES AND MECHANICAL PROPERTIES

Abstract. The purpose of this paper is to investigate the effect of microalloying with titanium, nitrogen, and aluminum on the set of mechanical properties of carbon steels with increased manganese and silicon content. This is due to the fact that steels with improved mechanical and operational properties are of great significance in the current situation of technology development. The studies are based on a comparison of the mechanical properties of known steel grades 2 and T, experimental industrial steel grade K and steels microalloyed with complexes – aluminum, titanium and nitrogen; aluminum and nitrogen of steel grade K. Metallographic analysis, determination of mechanical properties, chemical analysis and X-ray microanalysis are used. It is shown that complex microalloying with aluminum, titanium and nitrogen; aluminum and nitrogen of K grade steel contributes to the formation of a more fine-grained structure of pearlite and inclusions, compared to steel grades 2, T and K. In the structure of K steel, which is microalloyed with aluminum, titanium, and nitrogen, after casting, the formation of oxides, nitrides, carbonitrides, and multilayer inclusions located at the grain boundaries and in the grain volume is observed. After a full cycle of deformation and heat treatment, carbides, nitrides, and titanium carbonitrides remain in the steel structure. Whereas in steel, which is additionally microalloyed with aluminum and nitrogen on the basis of K steel, after solidification, a fine-grained structure with an increased volume fraction of pearlite is formed, the formation of inclusions of oxides, monosilicides of manganese and iron; sulfides and

complex carbides in comparison with known steel grades K, 2 and T occurs. According to the research results, K2 steel is proposed, which provides a high complex of mechanical properties after accelerated cooling with an average cooling rate of 11.0°C/s from a temperature of 850±10°C and further tempering at a temperature of 550±10 °C for 2 hours due to an increase in dispersivity of the ferrite-pearlite structure, strengthened by dispersed inclusions, in comparison with K1 steel. In steel K2, factors of strength, hardness and impact toughness are 10–15% higher than the same factors for steel K1.

Keywords: microstructure, mechanical tests, steel grades 2, T and K, microalloying with aluminum, titanium, nitrogen.

For citation: Filonenko, N. Yu., Babachenko, O. I., & Kononenko, G. A. (2023). Effect of microalloying of carbon steel with titanium, aluminum and nitrogen on structural peculiarities and mechanical properties. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 522-533. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-522-533>

*Стаття надійшла до редакції збірника 22.09.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*