

Філоненко Н.Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Волчук В.М.

Вплив комплексного мікролегування алюмінієм, титаном та азотом на структурний склад та механічні властивості вуглецевих сталей

Filonenko N.Yu., Babachenko O.I., Kononenko G.A., Volchuk V.M.

The influence of complex microalloying with aluminum, titanium and nitrogen on the structural composition and mechanical properties of carbon steels

Анотація. Леговані та мікролеговані сталі мають широке застосування в промисловості завдяки високому комплексу механічних властивостей. Відомо, що легируючі елементи чинять вплив на фазові перетворення та формування надлишкових фаз в сталях. Наразі, недостатньо літературних даних щодо впливу мікролегування комплексами алюмінію, титан та азот; алюмінію та азот на структурний стан та механічні властивості сталей. Метою даної роботи було дослідження впливу мікролегування комплексами алюмінію, титан та азот; алюмінію та азот на формування структурних складових та механічні властивості сталі. В роботі проведено дослідження структурних елементів, механічних властивостей та виконано порівняльний аналіз для двох дослідних сталей – марки К (з підвищеним вмістом кремнію, марганцю, мікролегованої ванадієм) та сталі марки К зі зменшеним вмістом ванадію, мікролегованої алюмінієм, титаном та азотом (К1); алюмінієм та азотом (К2). Для визначення структурного стану сталей використовували мікροструктурний та рентгеноструктурний аналізи. Окрім цього, в роботі були визначені механічні характеристики сталей. Отримані в даній роботі результати показали, що зменшення вмісту ванадію в сталі та комплексне мікролегування алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм та азотом сприяє утворенню структури з більш дрібними зернами та збільшенню об'ємної частки перліту. Встановлено, що додаткове мікролегування сталі комплексом алюмінію, титан та азот призводить до зменшення вмісту марганцю та кремнію в фериті та збільшення вмісту кремнію в цементиті, що можна пояснити зменшенням розчинності вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових. Крім цього, в структурі сталі спостерігали утворення включень, які були розташовані як по границям, так і в тілі зерен перліту. Встановлено, що в сталі К2, показники міцності та твердості вищі на 10-15% у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К.

Ключові слова: комплексне мікролегування сталі алюмінієм, титаном та азотом, включення, оксиди, нітриди, карбонітриди, властивості сталі.

Annotation. Alloyed and microalloyed steels are widely used in industry due to a high complex of mechanical properties. It is known that alloying elements influence phase transformations and the formation of excess phases in steels. Currently, there is insufficient literature data on the effect of microalloying with aluminum, titanium and nitrogen complexes; aluminum and nitrogen on the structural state and mechanical properties of steels. The purpose of this work was to study the effect of microalloying aluminum, titanium and nitrogen complexes; aluminum and nitrogen on the formation of structural components and mechanical properties of steel. In the work, a study of structural elements, mechanical properties, and a comparative analysis was performed for two experimental steels - grade K (with increased content of silicon, manganese, microalloyed with vanadium) and steel grade K with reduced content of vanadium, microalloyed with aluminum, titanium, and nitrogen (K1); aluminum and nitrogen (K2). To determine the structural state of steels, microstructural and X-ray structural analyzes were used. In addition, the work determined the mechanical characteristics of steels. The results obtained in this work showed that reducing the content of vanadium in steel and complex microalloying with aluminum, titanium and nitrogen; aluminum and nitrogen contributes to the formation of a structure with smaller grains and an increase in the volume fraction of pearlite. It was established that additional microalloying of steel with a complex of aluminum, titanium and nitrogen leads to a decrease in the content of manganese and silicon in ferrite and an increase in the content of silicon in cementite, which can be explained by a decrease in the solubility of carbon, manganese and silicon in structural components. In addition, the formation of inclusions was observed in the steel structure, which were located both along the boundaries and in the body of the pearlite grains. It was established that in steel K2, the strength and hardness indicators are higher by 10-15% compared to the indicators for steel K1 and by 15-17% than steel grade K.

Keywords: complex microalloying of steel with aluminum, titanium and nitrogen, inclusions, oxides, nitrides, carbonitrides, properties of steel.

Вступ. Леговані та мікролеговані сталі мають широке застосування в промисловості завдяки високому комплексу механічних властивостей. Відомо, що легируючі елементи чинять вплив на фазові перетворення та формування надлишкових фаз в сталях. Легуючі елементи можна умовно поділити

на (де)стабілізуючі карбіди та ферит при формуванні перліту [1]. До карбідоутворюючих елементів можна віднести Mn, Ti, V, Cr та Mo [2, 3], тоді як не карбідоутворюючі елементи (Si, Al, Ni та Co) мають більшу розчинність α -Fe [1–3].

Відомо, що кремній має вищу спорідненість до

Філоненко Нталія Юріївна – с.н.с., ІЧМ ім.З.І.Некрасова,

Бабаченко Олександр Іванович – д.т.н., ІЧМ ім.З.І.Некрасова,

Кононенко Ганна Андріївна - д.т.н., ІЧМ ім.З.І.Некрасова,,

Волчук Володимир Миколайович – д.т.н., ДВНЗ «ПДАБА».

Natalia Yuriivna Filonenko - Z.I. Nekrasov Institute of Medical Sciences,

Oleksandr Ivanovych Babachenko – dts, Z.I. Nekrasov Institute of Medical Sciences,

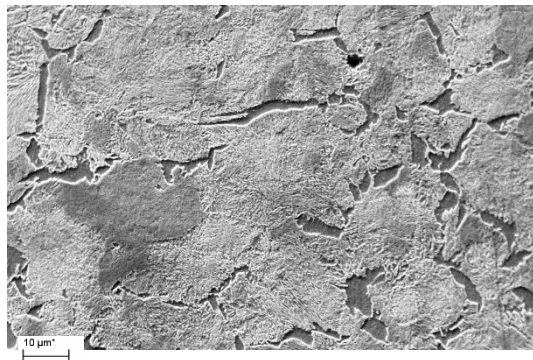
Hanna Andriivna Kononenko - dts, Z.I. Nekrasov Institute of Medical Sciences,

Volchuk Volodymyr Mykolayovych - dts, State Higher Secondary School "PDABA".

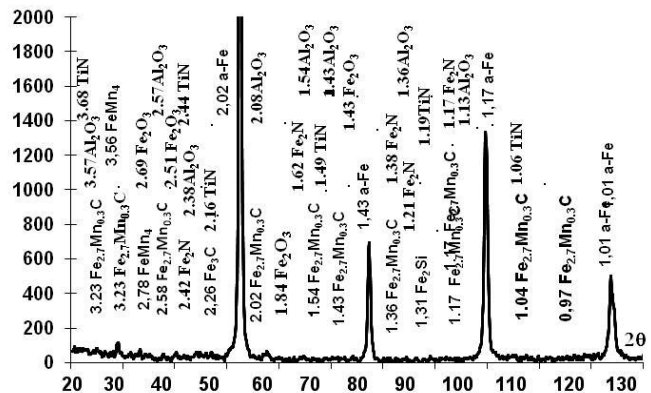
були виявлені високодисперсні включення, об'ємна частка яких складала близько 2 %. Як відомо, при легуванні залізних сплавів марганцем та кремнієм чистих карбідів марганцю та кремнію не існує, а утворюються складні карбіди [7–8]. У даному сплаві були виявлені карбіди $\text{Fe}_{2,7}\text{Mn}_{0,3}\text{C}$, $\text{Fe}_{0,25}\text{Mn}_{1,4}\text{C}_{0,6}$ та $\text{Fe}_9\text{SiC}_{0,4}$ (рис. 1, б).

Слід зазначити, що додаткове мікролегування сталі марки К комплексом алюміній, титан та азот

при зменшенні вмісту ванадію призводить до збільшення об'ємної частки перліту, зменшення розмірів зерна, що можна пояснити дією титану (рис. 2, а) [9]. Відомий спільний вплив Mn та Si на точку евтектики системи Fe-Fe₃C – обидва легуючі елементи здвигують точку S (евтектоїдна точка на фазовій діаграмі системи залізо-вуглець) до більшого вмісту вуглецю, що призводить до збільшення об'ємної частки перліту в сталі.



I imp/s



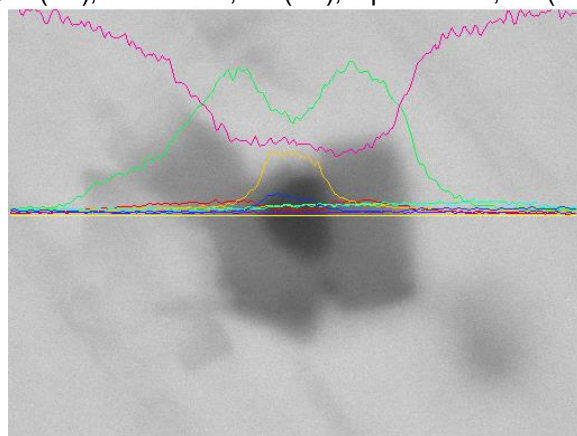
а

б

Рис. 2 Мікроструктура (а, ×1000) та дифрактограма (б) сталі марки К1

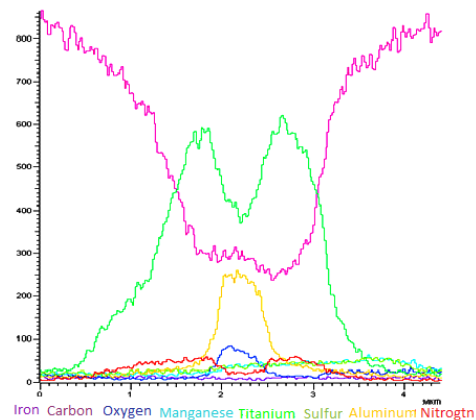
В сталі К1 по границях зерен спостерігали утворення сітки фериту, розмір зерна 6–7 номеру. Проведені в даній роботі мікрорентгеноспектральні дослідження поверхні зразків показали, що ферит може містити заліза до 90 % (ат.), до 0,5-0,9 % (ат.) марганцю, 0,1-0,16 % (ат.) кремнію, а титану до 1,0 % (ат.). Таким чином, додаткове мікролегування сталі призводить до зменшення вмісту кремнію та збільшення вмісту марганцю в фериті (рис. 2, б). Цементит перліту був легований марганцем до 2,0% (ат.), титаном 1,2% (ат.), кремнієм 1,2% (ат.)

та алюмінієм 0,4 % (ат.). Таким чином, додаткове мікролегування сталі комплексом алюміній, титан та азот призводить до зменшення вмісту марганцю та кремнію в фериті та збільшення вмісту кремнію в цементиті, що позитивно впливає на механічні властивості сталі К1, що можна пояснити зменшенням розчинності вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових та впливом титану [10–11]. Крім того, в структурі сталі К1 були виявлені окремі багаточарові включення, які мали розмір 1,5...2 мкм (рис. 3, а).



а

Электронное изображение 1



б

Рис. 3 Мікроструктура багаточарового включення (а) та спектрограма (б) сталі марки К1

В центрі багаточарових включень розташована фаза $\text{Al}(\text{TiFe})_2\text{O}_3$, яка оточена карбонітридом ($\text{Ti}_{0,3}\text{Fe}_{0,2}(\text{N}_{0,3}\text{C}_{0,2})$). Окрім цього, в сталі були виявлені нітриди – FeTiN , Ti_2FeN , які були леговані марганцем до 4,0% (ат.), кремнієм 0,5 % (ат.), ти-

таном до 5,0 % (ат.), алюмінієм до 4,0 % (ат.), сіркою до 2,0 % (ат.); карбонітриди – Fe_2CN , $\text{Fe}_3\text{Ti}_2\text{N}_3\text{C}$, FeTiNC . В структурі сплаву, окрім названих фаз, були зафіксовані оксиди –

Табл. 2

Механічні властивості дослідних сталей після гарячої пластичної деформації (ГПД) і термічної обробки (ТО)

Умовне позначення злитку	Границя плинності, МПа	Границя міцності, МПа	Відносне звуження, %	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см ²	Твердість, НВ
Після ГПД						
марка К	397,2	793,2	32,7	11,1	39,5	207
К1	394,7	802,6	32,5	19,6	32,5	209
К2	393,5	806,1	32,6	19,1	34,6	210
Після ГПД і ТО						
марка К	617,7	993,3	50,1	18,4	46,7	299
К1	637,2	998,3	19,7	11,1	51,9	306
К2	698,0	1148,3	40,2	15,4	53,2	348

З табл. 2 видно, що мікролегування сталі К алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм та азотом має позитивний вплив на показники в'язкості та пластичності. Встановлено, що у сталі К2 показники міцності та твердості будуть вищі на 10–15 % у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К

Висновки. 1. Зменшення вмісту ванадію в сталі та комплексне мікролегування алюмінієм, титаном та азотом призводить до утворення більш дрібнозернистої структури, зменшенню розмірів зерна та збільшення об'ємної частки перліту, у порівнянні зі сталлю марки К.

2. В структурі мікролегованих сталей К1 та К2 спостерігали утворення оксидів, нітридів та карбонітридів, які були розташовані квазірівномірно відносно зерна.

3. Використання комплексного мікролегування сталі К призводить збільшення показників ударної в'язкості та пластичності, за рахунок зменшення розмірів зерна, дисперсності включень. В сталі К2, показники міцності та на 10-15% у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К.

Бібліографічний опис

1. Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, J. Jiang Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite, *Materials Science and Technology* 2018. – Volume 34, Issue 7. – p. 780-785, DOI: 10.1080/02670836.2017.1407558.
2. C. Zhu, X. Xiong, A. Cerezo, et. al. Ultramicroscopy 107(9), 5 (2007) (DOI: 10.1016/j.ultramic.2007.02.033).
3. G. Miyamoto, K. O. J. Hono, et al. Effect of partitioning of Mn and Si on the growth kinetics of cementite in tempered Fe–0.6 mass% C martensite *Acta Mater.* 55(15), 11 (2007) (DOI: [10.1016/j.actamat.2007.05.023](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.05.023)).
4. Cias A., Chemical Reactions During Sintering of Fe-Cr-Mn-Si-Ni-Mo-C Steels with Special Reference to Processing in Semi-closed Containers, *Science of Sintering*, Vol. 47, No. 1, 2015, pp. 61–69. DOI: 10.2298/SOS1501061C.
5. Z. Zhu, Y. Liang, J. Zou, Modeling and Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms *Materials* 13(23), (2020) 5316(23); (DOI: [10.3390/ma13235316](https://doi.org/10.3390/ma13235316)) [5]. S. Curtze, V.-T. Kuokkala, A. Oikari, J. Talonen, H. Hänninen, *Acta Materialia* 59, 9 (2011) (DOI:10.1016/j.actamat.2010.10.037).
6. Filonenko N. Yu. 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, A. I. Babachenko, G. A. Kononenko, O.A. Safronova // *Materials Science*. – 2022. – Vol 58, № 2. – P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00648-0>.
7. O. V. Akymov, S. M. Nury, *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovik htekhnohoyi.* 6/11(78), 5 (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56370>).
8. Y.Y. Tu, Z.G. Mao, Q. Zhang, et.al. Atomistic interaction between silicon and manganese in pearlitic steel: Combined atom probe tomography and first-principle calculations *Mater Lett.* 134(84), 5 (2014) (DOI [10.1016/j.matlet.2014.07.057](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.057)).
9. P. Glowacz, M. Tenerowicz-Żaba, M. Sułowski, J. Konstanty, *Sintered Fe-Mn-Si-C Steels* NDT Days II(3), 6 2019.
10. Filonenko N. Solubility of Carbon, Manganese and Silicon in γ -Iron of Fe-Mn-Si-C alloys. / N. Filonenko, O. Babachenko, G. Kononenko, K. Domina // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2020. – V.21, (3). – P. 525-529. DOI: 10.15330/pcss.21.3.525-529.
11. Filonenko Nataliia Yu. Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in α -iron / Nataliia Yu. Filonenko, Olexander I. Babachenko, Hanna A.

Kononenko, Alexander S. Baskevich // East European Journal of Physics. – 2021. – 4. – С. 120-123.
DOI: 10.26565/4334-2021-4-14.

References

1. Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, J. Jiang Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite, *Materials Science and Technology* 2018. – Volume 34, Issue 7. – p. 780-785, DOI: 10.1080/02670836.2017.1407558.
2. C. Zhu, X. Xiong, A. Cerezo, et. al. Ultramicroscopy 107(9), 5 (2007) (DOI: 10.1016/j.ultramic.2007.02.033).
3. G. Miyamoto, K. O. J. Hono, et al. Effect of partitioning of Mn and Si on the growth kinetics of cementite in tempered Fe–0.6 mass% C martensite *Acta Mater.* 55(15), 11 (2007) (DOI: [10.1016/j.actamat.2007.05.023](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.05.023)).
4. Ciaś A., Chemical Reactions During Sintering of Fe-Cr-Mn-Si-Ni-Mo-C Steels with Special Reference to Processing in Semi-closed Containers, *Science of Sintering*, Vol. 47, No. 1, 2015, pp. 61–69. DOI: 10.2298/SOS1501061C.
5. Z. Zhu, Y. Liang, J. Zou, Modeling and Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms *Materials* 13(23), (2020) 5316(23); (DOI: [10.3390/ma13235316](https://doi.org/10.3390/ma13235316)) [5]. S. Curtze, V.-T. Kuokkala, A. Oikari, J. Talonen, H. Hänninen, *Acta Materialia* 59, 9 (2011) (DOI:10.1016/j.actamat.2010.10.037).
6. Filonenko N. Yu. 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, A. I. Babachenko, G. A. Kononenko, O.A. Safronova // *Materials Science*. – 2022. – Vol 58, № 2. – P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00648-0>.
7. O. V. Akymov, S. M. Nury, *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovik tekhnolohiyi*. 6/11(78), 5 (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56370>).
8. Y.Y. Tu, Z.G. Mao, Q. Zhang, et.al. Atomistic interaction between silicon and manganese in pearlitic steel: Combined atom probe tomography and first-principle calculations *Mater Lett.* 134(84), 5 (2014) (DOI [10.1016/j.matlet.2014.07.057](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.057)).
9. P. Głowacz, M. Tenerowicz-Żaba, M. Sułowski, J. Konstany, *Sintered Fe-Mn-Si-C Steels NDT Days II*(3), 6 2019.
10. Filonenko N. Solubility of Carbon, Manganese and Silicon in γ -Iron of Fe-Mn-Si-C alloys. / N. Filonenko, O. Babachenko, G. Kononenko, K. Domina // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2020. – V.21, (3). – P. 525-529. DOI: 10.15330/pcss.21.3.525-529.
11. Filonenko Nataliia Yu. Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in α -iron / Nataliia Yu. Filonenko, Olexander I. Babachenko, Hanna A. Kononenko, Alexander S. Baskevich // *East European Journal of Physics*. – 2021. – 4. – С. 120-123. DOI: 10.26565/4334-2021-4-14.