

УДК 621.723.

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ СТАЛІ

Соболь О.В., Шевченко С.М., Протасенко Т.О.,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Надано експериментальні результати впливу процесу комплексного іонного азотування за різними режимами на глибину азотованого шару. Визначено структурні особливості поверхневих та приповерхневих шарів сталі та характер розподілу мікротвердості по перерізу деталі. Встановлено, що технологія комплексного іонного азотування для модифікації сталі за рахунок глибинного азотування є ефективною та заслуговує впровадження й розвитку.

Ключові слова: іонне азотування, комплексна обробка, дифузія, глибина зміцнення, твердість, дифракційні спектри.

Вступ

Підвищення надійності елементів машин і механізмів є основним завданням збільшення їх ресурсу на цей час. Одним з головних засобів його вирішення є використання досягнень у сфері зміцнення поверхні, які забезпечуються новітніми енергозберігаючими та екологічно безпечними технологіями, що допомагають вирішувати питання модифікації поверхні на етапах створення, експлуатації та ремонту конструкційних елементів обладнання.

Модифікація структури і властивостей поверхні шляхом азотування дозволяє значно підвищити її твердість, зносостійкість, теплостійкість та інші функціональні характеристики, в тому числі під час експлуатації в умовах впливів значних та багаточислових навантажень. Тому роботи, що спрямовані на розвиток інноваційних технологій азотування, є актуальними і затребуваними промисловістю.

Аналіз публікацій

Найбільше промислове використання в наш час отримав метод «пічного азотування» сталей із застосуванням аміаку за температур від 500 до 600 °С. Використання цієї технології дозволяє досягати товщини азотованого шару в межах 0,2–0,6 мм за період 10–90 годин обробки [1]. Каталітичне азотування із застосуванням спеціальних каталізаторів для дисоціації аміаку дозволяє знизити тривалість обробки в печі удвічі [2].

Значно підвищити інтенсивність процесу дифузійного насичення поверхні азотом дозволяє іонне азотування з використанням низькотемпературної плазми [4]. У цьому випадку, в порівнянні з термічним «пічним азотуванням», значно знижується енергія активації дифузії [5] й підвищується коефіцієнт дифузії [6].

Перші вітчизняні теоретичні та експериментальні дослідження процесів азотування у вакуумі, а саме, обробки у тліючому розряді, відносяться до 60-х років минулого століття, тоді ж, власне, і почалося промислове впровадження цієї технології. Найбільш суттєві результати були отримані під керівництвом М. Лахтіна (МАДІ) і Б.М. Арзамасова (МВТУ ім. Баумана) [1, 4].

В першу чергу, дослідження стосувалися вивчення природи і параметрів тліючого розряду стосовно до технологічного процесу модифікації поверхні, його впливу на кінцеві результати. Тоді ж були проведені дослідження складу газового середовища у прикатодному просторі, які дозволили зробити принципово важливий висновок про роль атомарних іонів активного компонента. В цілому доведено, що азотування у тліючому розряді за якістю та іншими властивостями модифікованого шару не гірше газового азотування за істотно меншої (іноді на порядок) тривалості та значної економії енергоресурсів.

Так, іонне азотування в газовій плазмі вакуумно-дугових установок за температур від 500 до 600 °С не тільки дозволяє скоротити

час азотування до 1 години, але й, в порівнянні з пічним азотуванням, підвищує відносну зносостійкість азотованого шару [7, 8], дає можливість керувати фазовим складом (шляхом зміни енергетичних характеристик процесу або співвідношення робочих газів у суміші азоту і аргону), створює можливість для появи нових фаз на основі сполук з азотом [9–11], які не утворюються в умовах звичайного насичення азотом за підвищеної температури [12–14], а також дозволяє позбутися шкідливої дії аміаку [3, 4]. У процесі насичення під дією іонного бомбардування в матеріалі значно збільшується концентрація структурних дефектів [15], це сприяє підвищенню інтенсивності процесів дифузії, в тому числі масопереносу азоту [16].

Таке азотування звичайно проводять після термічної й механічної обробки [17]. При цьому у процесі азотування на вироби подають негативний потенціал від 800 до 1300 В [3], регулюючи його величину таким чином, щоб підтримувати температуру виробів у межах від 500 до 600 °С при струмах дуги від 50 до 100 А. Твердість поверхні виробів після азотування є високою і знаходиться на рівні до 11–17 ГПа залежно від складу сталі.

Однак вищезгаданими засобами неможливо азотувати вироби зі сталей з низькими температурами відпуску, наприклад таких як 9ХС, Х12МФ та ін., оскільки температура азотування перевищує температуру відпуску.

Крім того, аналіз результатів експлуатаційних випробувань азотованих сталей, що працюють в умовах ударно-циклічних навантажень, показав, що утворення на поверхні азотованого високотвердого шару з різкою границею розділу призводить до викришування поверхні. Це пов'язано з тим, що формування тонкої нітридної зони значно знижує пластичність азотованого шару [17]. Тому в останні роки проводяться пошукові дослідження технологій, які дозволяють проводити процес азотування з більшою рівномірністю розподілу азоту і на більшу глибину [18].

Мета і постановка завдання

Метою дослідження є вивчення впливу параметрів процесу низькотемпературного азотування в плазмі несамостійного дугового розряду низького тиску в поєднанні з подальшою термічною обробкою на структуру і властивості поверхневих і приповерхневих шарів пуансонів зі сталі 9ХС.

Методика та основний матеріал дослідження

У роботі використовувався метод азотування сталевих виробів у вакуумно-дуговому газовому розряді [1]. Цей спосіб реалізують в установці з вакуумною камерою, обладнаною вакуумно-дуговими випарниками. На рис. 1 наведено схему установки «Булат-6», яка призначена для азотування в дуговому газовому розряді.

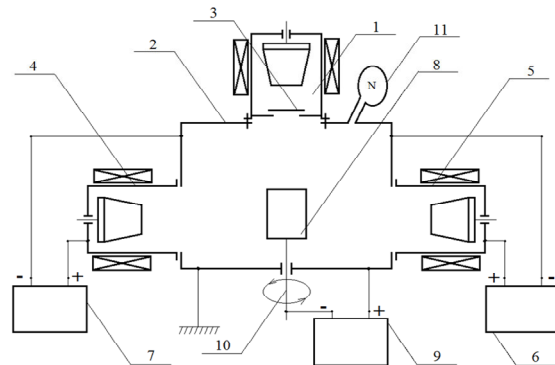


Рис. 1. Принципова схема вакуумно-дугової установки типу «Булат-6» для іонного азотування: 1, 4, 5 – вакуумно-дугові випарники; 2 – вакуумна камера; 3 – щільний екран; 6, 7 – джерела живлення газового розряду; 8 – азотовані вироби; 9 – високовольтне джерело; 10 – поворотний пристрій; 11 – натискач

Азотувалась партія пуансонів зі сталі 9ХС (рис. 2) у стані постачання. Азотування проводилося після попереднього відкачування до тиску 0,003 Па і тиску азоту (при напуску азоту) 0,3 Па. Регулюючи позитивний потенціал у межах від 100 до 150 В, підтримувалась температура азотування 500–600 °С протягом однієї години.

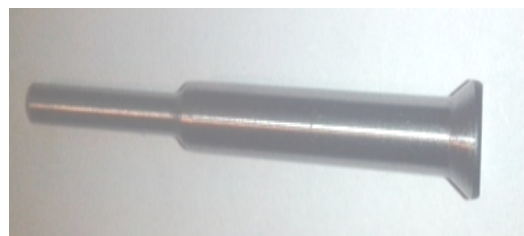


Рис. 2. Загальний вигляд пуансона

Термообробка після азотування здійснювалася в муфельній печі та складалася із гартування й низького відпуску, а саме: деталі гартувались (температура нагрівання – 820 °С, час витримання – $\tau = 20$ хв, охолодження –

в оливі), далі відпускались за температур 150 °С (режим № 2) та 250 °С (режим № 3). Після цього проводили механічну обробку (доводку): знімався припуск до 200 мкм. Режим №1 подібний режиму №2, але без зняття припуску (рис. 3).

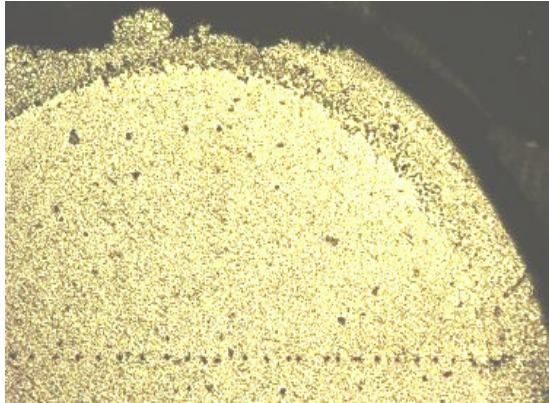


Рис. 3. Мікроструктура сталі 9XC після комплексного азотування за режимом №1 (x 50)

Згідно стандарту DIN 50190, частина 3, глибина азотованого шару визначалась на підставі вимірювання твердості (рис. 4). Метод застосовується для азотованих деталей незалежно від властивостей азотованого шару.

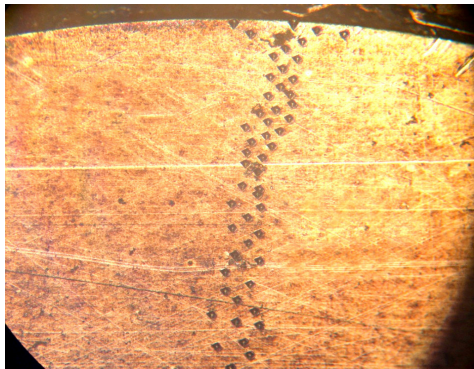


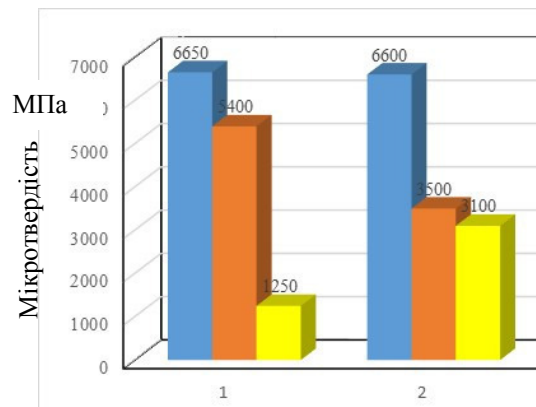
Рис. 4. Визначення глибини азотування методом вимірювання мікротвердості

Глибина азотованого шару визначається як відстань від поверхні в нормальному до неї напрямку до точки, в якій твердість відповідає встановленому граничному значенню (твердість сталі після термічної обробки без азотування).

На рисунках 5, 6, надані підсумкові діаграми рівня та глибини зміцнення в результаті комплексного іонного азотування сталі 9XC.

Комплексне іонне азотування за режимом, який включає в себе азотування та термічну обробку (рис. 3), формує на поверхні зразка значний знеуглецьований (технологічний)

шар з низькою мікротвердістю 2 800 МПа, глибиною до 210 мкм, тому після цього режиму необхідна механічна обробка для зняття цього шару.



■ – Середня твердість зміцненого шару; ■ – твердість серцевини; ■ – приріст твердості

Рис. 5. Результати вимірювання мікротвердості сталі 9XC після комплексної обробки (азотування, гартування і відпуску) за режимами 2 і 3 (1 – відпуск 150 °С), (2 – відпуск 250 °С)

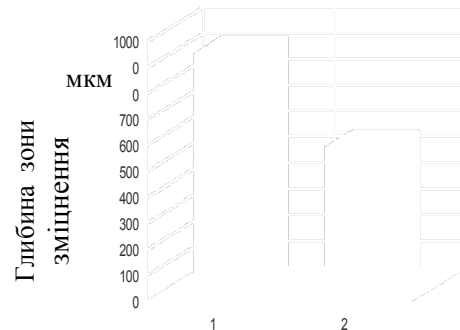


Рис. 6. Результати вимірювання глибини зони зміцнення сталі 9XC після комплексної обробки (азотування, гартування і відпуску) за режимами 2 і 3 (1 – відпуск 150 °С), (2 – відпуск 250 °С)

Комплексне іонне азотування за режимом з низьким відпуском 150 °С, що включає в себе механічну обробку, формує структуру з мікротвердістю 6 180–6 650 МПа; мікротвердість серцевини становить 5 400–5 500 МПа. Приріст твердості після цієї обробки становить 1 250 МПа, розмір зони зміцнення 920 мкм.

Комплексне іонне азотування за режимом з механічною обробкою та відпуском 250 °С формує структуру з мікротвердістю 6600 МПа,

мікротвердість серцевини становить 3 400–3 600 МПа. Приріст твердості після цієї обробки становить 3 100 МПа, розмір зони зміцнення – 560 мкм.

За даними рентгенівської дифрактометрії ($S_{\alpha-\alpha}$), структура зміцненого шару складається із двофазної композиції: α -твердого розчину та зерен нітриду Fe_4N , структура є дрібнодисперсною, з розміром областей когерентного розсіювання близько 10 нм.

В якості рекомендації пропонується деталі після комплексної обробки, крім механічної обробки із припуском до 200 мкм, проводити доводку чистовим шліфуванням із припуском 20–40 мкм для отримання високого класу шорсткості.

Порівнюючи режими №2 і №3, можна визначити, що приріст зміцнення вище після режиму №3, з більш високою температурою відпуску – 250 °С, а розмір зони зміцнення більше після режиму №2 з відпуском 150 °С (хоча значення глибини зони зміцнення повинні бути практично однаковими, а різниця пояснюється нерівномірністю процесів перетворення структури з різних сторін деталі (рис. 7, а, б).

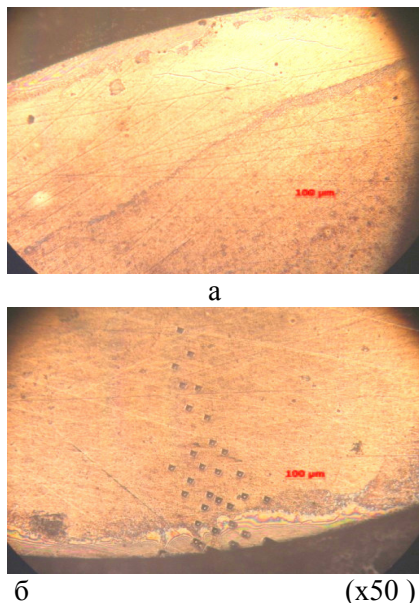


Рис. 7. Мікроструктура пуансону зі сталі 9ХС після комплексного азотування за режимом №2 (відпуск 150 °С (а, б – різні сторони одного зразка)

В обох режимах значення мікротвердості поверхневої зміцненої зони практично не відрізняється (6 600 МПа).

Висновки

1. Комплексна обробка методом іонного азотування дозволяє збільшити глибину проникнення азоту, тобто рівень зміцнення поверхні (1 250–3 100 МПа).

2. Оптимальним режимом обробки в рамках даного дослідження є режим №3, з відпуском 250 °С.

3. У процесі комплексної обробки виникає глибокий технологічний шар, тому необхідно обов'язково проводити кінцеву механічну обробку.

4. Під час проведення комплексної обробки треба враховувати положення деталі відносно потоку іонів азоту, для формування більш рівномірного шару.

5. Рекомендується проведення обов'язкового чистового шліфування для зняття залишку технологічного шару глибиною 20–40 мкм.

Дослідження показало, що комплексне іонне азотування для модифікації сталі є ефективним та перспективним методом зміцнення за рахунок глибокого легування азотом. При цьому значно прискорюється процес азотування, оскільки атоми азоту легше проникають у незагартовану сталь, час азотування не перевищує 1 години. Але було виявлено ряд недоліків та проблем цього комплексного методу, а саме: нерівномірність глибини зони зміцнення по перерізу деталі, різну глибину технологічного шару, який необхідно шліфувати.

Отримані в роботі результати стали основою для спрямованої модифікації поверхні промислових партій пуансонів різного призначення. В наш час проводяться їх виробничі випробування і накопичення статистичних даних.

Література

1. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с. <https://lib-bkm.ru/13980>
2. Зинченко В. М. Азотный потенциал: современное состояние проблемы и концепция развития / В. Я. Сыропятов, Б. А. Прусаков, Ю. А. Перекатов. – М.: ФГУП «Издательство «Машиностроение», 2003. – 90 с. <https://www.nakal.ru/upload/iblock/d82/d8263aa73e3dec953ddb28d02dbad03e.pdf>
3. Андреев А.А. Вакуумно-дуговые покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. –

- 317 с. <https://www.twirpx.com/file/1188327/>
4. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти // – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1995. – 400 с.
 5. Torchane L. Control of iron nitride layers growth kinetics in the binary Fe-N system / L. Torchane, P. Bilger, J. Dulcy, M. Gantois // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1996. – Vol. 27, Iss.7. – P.1823–1835. <https://doi.org/10.1007/BF02651932>
 6. Pinedo C. E. On the kinetics of plasma nitriding a martensitic stainless steel type AISI 420 / C. E. Pinedo, W. A. Monteiro // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 179. – P.119–123. DOI: [10.1016/S0257-8972\(03\)00853-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00853-3)
 7. Manova D. Microstructure of nitrogen implanted stainless steel after wear experiment / D. Manova, D. Hirsch, E. Richter, S. Mändl, H. Neumann, B. Rauschenbach // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – Iss. 19–20. – P. 8329–8333. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.10.060](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.060)
 8. Wei C. C. Analyses of Material Properties of Nitrided AISI M2 Steel Treated by Plasma Immersion Ion Implantation (PIII) Process / C. C. Wei // Advanced Science Letters. – 2012. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 148–154. DOI: [10.1166/193666112800850833](https://doi.org/10.1166/193666112800850833)
 9. Williamson D. L. Metastable phase formation and enhanced diffusion in f.c.c. alloys under high dose, high flux nitrogen implantation at high at low ion energies / D. L. Williamson, O. Ozturk, R. Wei, P. J. Wilbur // Surface and Coatings Technology. – 1994. – Vol. 65. – P. 15–23. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(94\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(94)80003-0)
 10. Yang S. Development of advanced duplex surface systems by combining CrAlN multi-layer coatings with plasma nitrided steel substrates / S. Yang, K. Cooke, H. Sun, X. Li, K. Lin, H. Dong. // Surface & Coatings Technology. – 2013. – V. 236. – P. 2–7. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2013.07.017](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.017)
 11. Sobol O. V. Structural engineering vacuum-plasma coatings interstitial phases / O. V. Sobol // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 02024 1.2. DOI: [10.21272/jnep.8\(2\).02024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(2).02024)
 12. Campos M. Improving the empirical model for plasma nitride AISI 316L corrosion resistance based on Mössbauer spectroscopy / M. Campos, S. D. de Souza, de S. Souza, M. Olson-Dionysio // Huperfine Interact. – 2011. – Vol. 203. – P.105–112. DOI: [10.1007/s10751-011-0351-3](https://doi.org/10.1007/s10751-011-0351-3)
 13. Ozturk O. Phase and composition depth distribution analyses of low energy, high flux N implanted stainless steel / O. Ozturk, D. L. Williamson // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 77. – P. 38–39. <https://doi.org/10.1063/1.358561>
 14. Fernandes B. B. Mechanical properties of nitrogen-rich surface layers on SS 304 treated by plasma immersion ion implantation / B. B. Fernandes, S. Mändl, S. M. Oliveira, M. Ueda // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 310. – P. 278–283 doi: [10.1016/j.apsusc.2014.04.142](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.142).
 15. Köster K. Material condition tailored to plasma nitriding process for ensuring corrosion and wear resistance of austenitic stainless steel / K. Köster, P. Kaestner, G. Bräuer, H. Hoche, T. Troßmann, M. Oechsner // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228 (1). – P. S615–S618. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2011.10.059](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.059)
 16. Maistro G. Thermal decomposition of N-expanded austenite in 304L and 904L steels / G. Maistro, S. Pérez-García, M. Norell, L. Nyborg, Y. Cao // Surface Engineering. – 2017. – Vol. 33 (4). – P. 319–326. DOI: [10.1080/02670844.2016.1262989](https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1262989)
 17. Григорьев С. Н. Модификация структуры и свойств быстрорежущих сталей путем комбинированной вакуумно-плазменной обработки / С. Н. Григорьев, А. С. Метель, С. В. Федоров // Металловедение и термическая обработка. – 2012. – Т. 679 (1). – С. 9–14. <http://mitom.folium.ru/contents/2012/2012-01.php>
 18. Богачев И. И. Разработка технологии глубокого ионно-плазменного азотирования / И. И. Богачев, В. Н. Климов // Научная дискуссия: вопросы технических наук. – 2016. – Т. 33 (№3). – С. 53–56. [http://internauka.org/archive2/tex/3\(33\).pdf](http://internauka.org/archive2/tex/3(33).pdf)

Reference

1. Lahtin Yu. M. Teoriya i tehnologiya azotirovaniya [Theory and technology of nitriding] / Yu. M. Lahtin, Ya. D. Kogan, G.I. Shpis, Z. Bemer // – М.: Metallurgiya, 1991. – 320 s. [in Russian] <https://lib-bkm.ru/13980>
2. Zinchenko V. M. Azotnyiy potentsial: sovremennoe sostoyanie problemy i kontseptsiya razvitiya [Nitrogen potential: current state

- problems and development concept] / V. Ya. Syropyatov, B. A. Prusakov, Yu. A. Perekatov // – M.: FGUP «Izdatelstvo «Mashinostroenie», 2003. – 90 s. [in Russian] <https://www.nakal.ru/upload/iblock/d82/d8263aa73e3dec953ddb28d02dbad03e.pdf>
3. Andreev A. A. Vacuumno-dugovye pokrytiya [Vacuum arc coatings] / A. A. Andreev, L. P. Sablev, S. N. Grigoriev // Kharkov: NNC HFTI, 2010, – 317 s. [in Russian] <https://www.twirpx.com/file/1188327/>
 4. Arzamasov B. N. Ionnyaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov [Ionic chemical heat treatment of alloys] / B. N. Arzamasov, A. G. Bratukhin, Yu. S. Eliseev, T. A. Panayoti // – M.: MGTU im. Bauman, 1995. – 400 s. [in Russian]
 5. Torchane L. Control of iron nitride layers growth kinetics in the binary Fe-N system / L. Torchane, P. Bilger, J. Dulcy, M. Gantois // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1996. - Vol. 27, Iss.7. – P.1823–1835. <https://doi.org/10.1007/BF02651932>
 6. Pinedo C. E. On the kinetics of plasma nitriding a martensitic stainless steel type AISI 420 / C. E. Pinedo, W. A. Monteiro // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 179. – P.119–123. DOI: [10.1016/S0257-8972\(03\)00853-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00853-3)
 7. Manova D. Microstructure of nitrogen implanted stainless steel after wear experiment / D. Manova, D. Hirsch, E. Richter, S. Mändl, H. Neumann, B. Rauschenbach // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – Iss. 19–20. – P. 8329–8333. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.10.060](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.060)
 8. Wei C. C. Analyses of Material Properties of Nitrided AISI M2 Steel Treated by Plasma Immersion Ion Implantation (PIII) Process / C. C. Wei // Advanced Science Letters. – 2012. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 148–154. DOI: [10.1166/193666112800850833](https://doi.org/10.1166/193666112800850833)
 9. Williamson D.L. Metastable phase formation and enhanced diffusion in f.c.c. alloys under high dose, high flux nitrogen implantation at high at low ion energies / D. L. Williamson, O. Ozturk, R. Wei, P.J. Wilbur // Surface and Coatings Technology. – 1994. – Vol. 65. – P. 15–23. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(94\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(94)80003-0)
 10. Yang S. Development of advanced duplex surface systems by combining CrAlN multi-layer coatings with plasma nitrided steel substrates / S. Yang, K. Cooke, H. Sun, X. Li, K. Lin, H. Dong. // Surface & Coatings Technology. – 2013. –V. 236. – P. 2–7. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2013.07.017](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.017)
 11. Sobol O. V. Structural engineering vacuum-plasma coatings interstitial phases / O. V. Sobol // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. –Vol. 8, Issue 2. – P. 02024 1.2. DOI: [10.21272/jnep.8\(2\).02024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(2).02024)
 12. Campos M. Improving the empirical model for plasma nitride AISI 316L corrosion resistance based on Mössbauer spectroscopy / M. Campos, S. D. de Souza, de S. Souza, M. Olson-Dionysio // Huperfine Interact. – 2011. – Vol. 203. – P.105–112. DOI: [10.1007/s10751-011-0351-3](https://doi.org/10.1007/s10751-011-0351-3)
 13. Ozturk O. Phase and composition depth distribution analyses of low energy, high flux N implanted stainless steel / O. Ozturk, D. L. Williamson // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 77. – P. 38–39. <https://doi.org/10.1063/1.358561>
 14. Fernandes B. B. Mechanical properties of nitrogen-rich surface layers on SS 304 treated by plasma immersion ion implantation / B. B. Fernandes, S. Mändl, S. M. Oliveira, M. Ueda // Applied Surface Science. – 2014. –Vol. 310. – P. 278–283 doi: [10.1016/j.apsusc.2014.04.142](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.142).
 15. Köster K. Material condition tailored to plasma nitriding process for ensuring corrosion and wear resistance of austenitic stainless steel / K. Köster, P. Kaestner, G. Bräuer, H. Hoche, T. Troßmann, M. Oechsner // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228 (1). – P. S615–S618. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2011.10.059](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.059)
 16. Maistro G. Thermal decomposition of N-expanded austenite in 304L and 904L steels / G. Maistro, S. Pérez-García, M. Norell, L. Nyborg, Y. Cao // Surface Engineering. – 2017. – Vol. 33 (4). – P. 319–326. DOI: [10.1080/02670844.2016.1262989](https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1262989)
 17. Grigorev S. N. Modifikatsiya struktury i svoystv byistrorezhuschih staley putem kombinirovannoy vakuumno-plazmennoy obrabotki [Modification of the structure and properties of high-speed steels by a combined vacuum-plasma processing] / S. N. Grigorev, A. S. Metel, S. V. Fedorov // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – 2012. – T. 679 (1). – S. 9–14. [in Russian] <http://mitom.folium.ru/contents/2012/2012-01.php>
 18. Bogachev I. I. Razrabotka tehnologii glubokogo ionno-plazmennogo azotirovaniya [Development of deep ion-plasma nitriding technology] / I. I. Bogachev, V. N. Klimov //

Nauchnaya diskussiya: voprosy tehnicheskikh nauk. – 2016. – Т. 33 (№ 3). – С. 53–56. [in Russian]
[http://internauka.org/archive2/tex/3\(33\).pdf](http://internauka.org/archive2/tex/3(33).pdf)

Соболь Олег Валентинович – доктор фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Матеріалознавство»,
 тел.: (057) 707 – 64 – 35
 E-mail: sool@kpi.kharkov.ua

Шевченко Світлана Михайлівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Матеріалознавство»,
 тел.: (057) 707 – 64 – 35
 E-mail: svsshev970819@gmail.com

Протасенко Тетяна Олександрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство»,
 тел.: (057) 707 – 64 – 35

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF COMPLEX ION NITRIDING FOR STEEL MODIFICATION

Sobol O.V, Shevchenko S.M.,
 Protasenko T.O., National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Abstract. Problem. The development of integrated ion nitriding technology is actual for industrial production. This method is in the development stage, especially for steels that are not classical for nitriding, for example, cheap and available steel 9XC for production. **The goal** of the research is to study the influence parameters of the process of low-temperature nitriding in plasma of a non-independent low-pressure arc discharge on structure and properties of the surface and near-surface layers of punches from steel 9XC in combination with subsequent heat treatment. **Results.** The research solved the following tasks: 1. A metallographic analysis of 9XC steel samples after complex ion nitriding is carried out, which includes nitriding and subsequent heat treatment (quenching and tempering at various temperatures). 2. Measured microhardness of surface and near-surface layers in depth. 3. Phase analysis is done. 4. Determined depths of nitrogen-hardened layers and their morphological features. 5. Conclusions are made on the practical use of integrated ion

nitriding technology. **Practical value.** For hardening punches of steel 9XC method of complex processing are proposed and tested in the work. It includes nitriding in a vacuum gas discharge before quenching and tempering. At the same time, the process of diffusion of nitrogen atoms is significantly accelerated (since nitrogen atoms more easily penetrate non-hardened steel), which leads to an increase in the depth to the penetration of nitrogen atoms and a change in structure and hardness. It was established that, by properties, the impact area is divided into a surface layer (with a thickness of about 200 μm) with a lower hardness and a deeper working layer with a higher hardness. The size of the strengthening zone is 560–920 μm .

At the same time, increased hardness compared to the main structure without nitriding is remained at a depth exceeding 2000 μm . The surface layer of parts with low hardness must be mechanically processed to obtain the required dimensional accuracy and roughness. The surface hardness of the punches made of steel 9XC after such treatment is at the level of 6600 MPa. The phase composition of the nitrated layer with high hardness consists of the lower nitride of Fe_3N and a solution of nitrogen in $\alpha\text{-Fe}$. The results obtained are relevant for steel with a low tempering temperature.

Key words: ion nitriding, complex processing, diffusion, depth of action, hardness, diffraction spectra.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СТАЛИ

Соболь О.В., Шевченко С.М.,
 Протасенко Т.А., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация. Предоставлены экспериментальные результаты влияния процесса комплексного ионного азотирования по разным режимам на глубину упрочненного слоя. Определены структурные особенности поверхностных и приповерхностных слоев стали и характер распределения микротвердости по сечению детали. Установлено, что технология комплексного ионного азотирования для модификации стали за счет глубинного азотирования является эффективной и заслуживает внедрения и развития.

Ключевые слова: ионное азотирование, комплексная обработка, диффузия, глубина упрочнения, твердость, дифракционные спектры.