

УДК 621.9.048.7:621.785.53.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

**О.В. Чудина, профессор, д.т.н., В.М. Матюнин, профессор, д.т.н.,
А.А. Брежнев, зав. лаб., МАДИ (ГТУ), Национальный исследовательский
университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия**

***Аннотация.** Предложена комбинированная технология поверхностного упрочнения высокоуглеродистых сталей, заключающаяся в лазерном легировании с последующим азотированием и которая позволяет получать упрочненные слои толщиной до 700 мкм с микротвердостью до 12000 МПа. Установлены технологические параметры лазерной обработки, позволяющие формировать на поверхности углеродистой стали легированные слои с мелкозернистой структурой и дисперсными карбидами.*

***Ключевые слова:** лазерное легирование, азотирование, углеродистые стали.*

ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ НА ПОВЕРХНІ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ ШАРІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ НАГРІВАННІ

**О.В. Чудіна, професор, д.т.н., В.М. Матюнін, професор, д.т.н.,
А.А. Брежнєв, зав. лаб., МАДІ (ДТУ), Національний дослідницький університет
«Московський енергетичний інститут», м. Москва, Росія**

***Анотація.** Запропоновано комбіновану технологію поверхневого зміцнення високовуглецевих сталей, що полягає в лазерному легуванні з наступним азотуванням і дозволяє отримувати зміцнені шари товщиною до 700 мкм із микротвердістю до 12000 МПа. Встановлено технологічні параметри лазерної обробки, що дозволяють формувати на поверхні вуглецевої сталі леговані шари із дрібнозернистою структурою і дисперсними карбідами.*

***Ключові слова:** лазерне легування, азотування, вуглецеві сталі.*

IMPROVING STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON STEEL BY FORMING OF HIGH ALLOYED LAYERS ON THE SURFACE AT LASER HEATING

O. Chudina, Professor, Doctor of Technical Science, V. Matunin, Professor, Doctor of Technical Science, A. Brezhnev, head of laboratory, MADI (STU), National Research «University Moscow Energy Institute», Moscow, Russia

***Abstract.** We propose a combined technology of surface hardening of high carbon steels consisting of laser alloying with subsequent nitriding. It makes possible to obtain hardened layers with the thickness up to 700 microns with microhardness of up to 12000 MPa. Technological parameters of laser treatment allowing obtaining on the surface of the carbon steel alloy layers with a fine-grained structure and dispersed carbides were defined.*

***Key words:** laser alloying, nitriding, carbon steel.*

Введение

В настоящее время лазерная обработка используется для повышения прочностных ха-

рактеристик различных материалов, в том числе и углеродистых сталей. Ее преимуществами являются высокая скорость, точность и качество обработки [1]. Однако при этом

могут возникать неблагоприятные растягивающие напряжения, снижающие надежность и долговечность изделий. Устранение этого недостатка лазерного легирования является актуальной задачей.

Анализ публикаций

Легирование при лазерном нагреве позволяет получать слои толщиной до 300 мкм при импульсном воздействии и до 700–800 мкм при непрерывном. При этом распределение легирующего элемента в зоне лазерного воздействия, как правило, равномерно по всей толщине. Высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к образованию неравновесных структур с высокой микротвердостью. Преимуществами лазерного легирования, по сравнению с другими способами модифицирования поверхности, являются экономия легирующего элемента, минимальная последующая механическая обработка, экономия трудовых затрат [1]. Недостатком лазерного легирования являются неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения на границе между зоной лазерного воздействия и материалом матрицы, приводящие к образованию трещин в процессе эксплуатации [2, 3]. Напряжения можно уменьшить дополнительным нагревом, но при этом снижается твердость упрочненных слоев [3].

Известно также, что азотирование углеродистых сталей, практически не повышая твердости, обеспечивает улучшение антифрикционных характеристик при контактных нагрузках [4].

Для повышения прочности, контактной выносливости и сопротивления износу необходимо увеличить поверхностную твердость слоя, что обычно достигается азотированием сталей, легированных нитридообразующими элементами. Легирующие элементы изменяют растворимость азота в α -фазе, растворяются в ε - и γ' -фазе, образуя самостоятельные дисперсные нитриды. При азотировании сплавов железа в γ' - и ε -фазах часть атомов железа замещается легирующими элементами, возникают комплексные нитридные соединения $(\text{Fe},\text{M})_4\text{N}$, $(\text{Fe},\text{M})_3\text{N}$, $(\text{Fe},\text{M})_2\text{N}$. Область гомогенности γ' -фазы расширяется, а легирование ε -фазы повышает ее твердость и сопротивление износу. При этом твердость зоны внутреннего азотирования определяется выделением нитридов легирующих элементов [6].

Из числа металлов переходной группы нитриды образуют только те элементы, у которых предпоследняя электронная d -подгруппа менее достроена, чем у железа, причем склонность к образованию нитридов возрастает в следующей последовательности: $\text{Ni} \rightarrow \text{Co} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Cr} \rightarrow \text{Mo} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{Nb} \rightarrow \text{V} \rightarrow \text{Ti} \rightarrow \text{Zr}$ [5, 7].

Цель и постановка задачи

Целью работы является повышение прочностных характеристик и износостойкости углеродистых сталей с помощью комбинированной технологии, состоящей из легирования нитридообразующими элементами при лазерном нагреве и последующего азотирования.

Материалы и методика исследований

Исследования проводили на высокоуглеродистых сталях У8 и У10. Поверхность образцов обезжиривали ацетоном, затем наносили обмазку, состоящую из порошка легирующего элемента (Mo , V , W , Ti , Nb , Cr , Al) и связующего вещества, в качестве которого использовался цапонлак. Обработку опытных образцов проводили на газоразрядном CO_2 -лазере мощностью 600 Вт в защитной атмосфере аргона при различных скоростях перемещения лазерного луча: от 5 до 30 мм/с. Азотирование проводили при температуре 570 °С в течение 6 часов со степенью диссоциации аммиака 30 %. Микроструктуры шлифов исследовали на микроскопе Axiovert 25 SA. Измерения твердости упрочненных слоев проводили по стандартной методике на микротвердомере ПМТ-3.

Кроме того, проводили исследования прочности упрочненных слоев после лазерного легирования сталей У8 и У10 по методике Московского энергетического института на приборе МЭИ-Т7. Методика определения прочности упрочненных слоев заключается в измерении твердости по Бринеллю алмазным индентором диаметром $D = 0,4$ мм под нагрузкой $P = 30D^2 = 30 \times 0,16 = 4,8$ кг при времени выдержки 5 с и последующем переводе твердости в значения НВ для индентора диаметром $D = 1$ мм с учетом масштабного фактора. Полученные значения твердости НВ с индентором 1 мм под нагрузкой $P = 30xD^2 = 30 \times 1 = 30$ кг соответствуют стандартным испытаниям по ГОСТ 9012-59, 22761-77. В соответствии с методикой МЭИ значения предела прочности σ_B определяли по анали-

тическим зависимостям перевода значений твердости HB1/30/5 в значения σ_B .

Результаты исследования и их обсуждение

На формирование легированной зоны на поверхности углеродистой стали под действием непрерывного лазерного излучения оказывают влияние следующие факторы: химический состав и количество обмазки, мощность и скорость перемещения лазерного луча. С увеличением скорости движения лазерного луча от 5 до 25 мм/с толщина зоны легирования уменьшается от 700 ± 100 до 350 ± 100 мкм. Разброс значений зависит от теплофизических свойств обмазки.

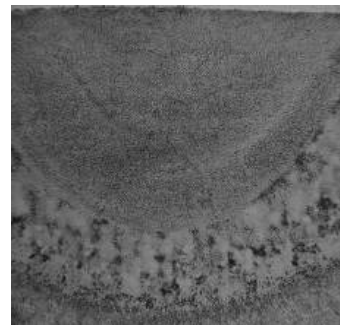
Исследования показали, что скорость перемещения лазерного луча существенно влияет на структурообразование и микротвердость сталей У8 и У10. Так, экспериментально установлены режимы лазерного легирования, позволяющие получать мелкозернистую структуру. При мощности излучения 600 Вт и скорости перемещения лазерного луча 5–15 мм/с в зоне лазерного легирования углеродистой стали формируется однородная мелкозернистая перлитная структура с выделениями дисперсных карбидов с высокой твердостью. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя носит равномерный характер, что косвенно указывает на равномерное распределение легирующего элемента в ванне расплава.

Размер зерна зависит от типа легирующего элемента. При легировании молибденом размер зерна в зоне легирования составляет 1–3 мкм, ванадием и хромом – 2–4 мкм, титаном – 4–5 мкм, алюминием – 5–7 мкм, (рис. 1 и 2). Аналогичные результаты получены и при лазерном легировании малоуглеродистых сталей [5].

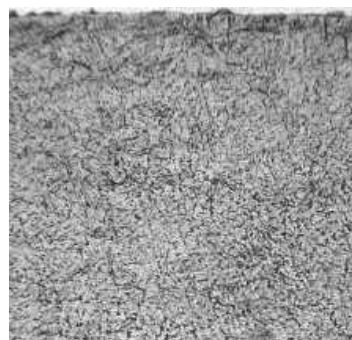
С увеличением скорости перемещения луча лазера 15–30 мм/с образуется структура мелкоигольчатого мартенсита с включениями мелкодисперсных карбидов с твердостью до 14000 МПа (рис. 1, 2). Дальнейшее увеличение скорости перемещения луча выше 30 мм/с приводит к тому, что вся обмазка расплавляется раньше, чем начинает плавиться образец и происходит лазерная наплавка.

Таким образом, путем варьирования технологических параметров лазерной обработки

на поверхности углеродистой стали можно формировать легированные слои толщиной до 700 мкм с благоприятной, с точки зрения повышения конструкционной прочности, структурой мелкозернистого перлита или мелкоигольчатого мартенсита с выделениями дисперсных карбидов.



а

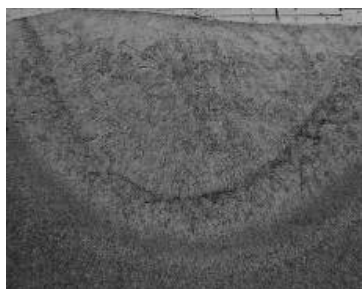


б

Рис. 1. Микроструктуры стали У8 после легирования титаном в непрерывном режиме излучения ($P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с): а – (x100); б – (x1000)

При лазерном легировании некоторыми карбидо- и нитридообразующими элементами, например ванадием, со скоростями перемещения лазерного луча более 10 мм/с наблюдается повышение микротвердости в зоне термического влияния (под зоной переплава) на глубину до 200 мкм. При этом микротвердость в зоне плавления в непосредственной близости к границе с зоной термического влияния в 1,25–2,5 раза меньше, чем в зоне термического влияния. Характер распределения микротвердости по толщине слоя при легировании вольфрамом, ванадием и молибденом показан на рис. 3. Скачкообразное изменение микротвердости вблизи границы легированной зоны с основной и зоной термического влияния объясняется, во-первых, некоторым снижением содержания легирующих элементов вследствие особенностей

массопереноса, возникающих при конвективном перемешивании, а во-вторых, обезуглероживанием зоны легирования [5]. Такой характер изменения микротвердости на границе зоны переплава с основным материалом указывает на неблагоприятное распределение остаточных напряжений в зоне термического влияния, устранить которое без заметного снижения твердости можно путем низкотемпературного азотирования.



а



б

Рис. 2. Микроструктуры стали У10 после легирования ванадием в непрерывном режиме излучения ($P = 600$ Вт, $V = 15$ мм/с): а – ($\times 100$); б – ($\times 1000$)

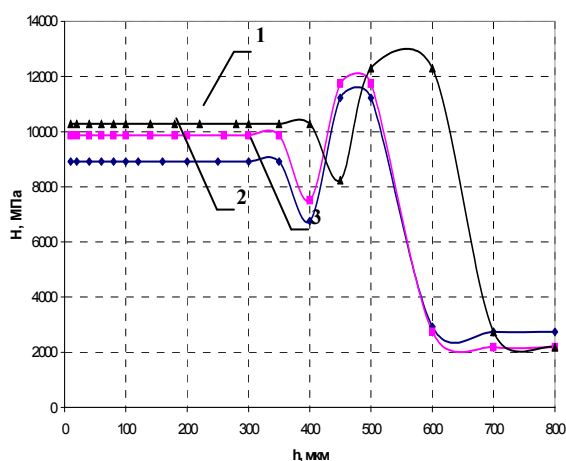
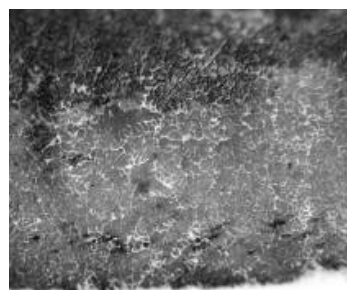


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя стали У10 после легирования молибденом, ванадием и вольфрамом в непрерывном режиме излучения ($P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с): 1 – Мо; 2 – V; 3 – W

С этой целью после легирования при лазерном нагреве образцы из сталей У8 и У10 подвергали азотированию при температуре 570°C в течение 6 часов. Микроструктуры стали У8, предварительно легированной хромом, представлены на рис. 4. На рис. 4, а видно, что азотирование происходило не только по поверхности образца, но и по границе между матрицей и зоной лазерного легирования. Это связано, во-первых, с тем, что азот диффундирует не только вглубь, но и в направлении легированных зон, так как легирующие элементы повышают растворимость азота в феррите; во-вторых, с тем, что на границе между зоной плавления и матрицей в зоне термического влияния повышается плотность дислокаций, что облегчает диффузию азота.



а



б

Рис. 4. Микроструктуры стали У8 после легирования хромом в непрерывном режиме излучения ($P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с) и последующего азотирования (570°C , 6 часов): а – $\times 100$, б – $\times 1000$

Также четко видна граница диффузионного слоя, под которой наблюдается непрочная зона лазерного легирования. Выявить микроструктуру этой зоны не удастся даже концентрированной азотной кислотой. Отсутствие травимости указывает на высокую коррозионную стойкость упрочненного слоя, что является следствием повышенной

концентрации хрома, находящегося в твердом растворе после лазерного легирования.

На рис. 4, б при большом увеличении показано строение диффузионного слоя, представляющее собой мелкозернистую структуру с азотистой фазой по границам зерен; толщина его составляет ≈ 70 мкм. Поскольку при нагреве до 570°C и последующей выдержке при азотировании размер зерна не увеличивается [5], то можно утверждать, что и до азотирования структура зоны лазерного легирования имела такое же мелкое зерно. Результаты дюрOMETрических исследований стали У8, легированной хромом до и после азотирования, представлены на рис. 5.

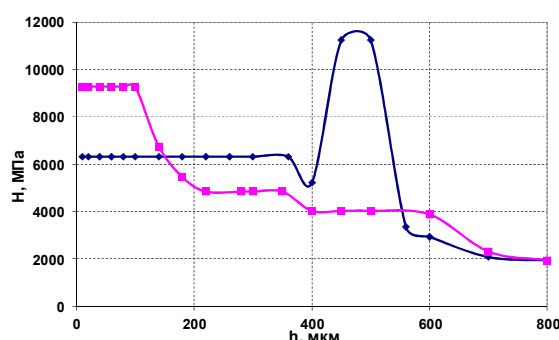


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя стали У8 после легирования хромом в непрерывном режиме излучения $P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с – 1, и последующего азотирования при температуре 570°C в течение 6 часов – 2

Из графиков видно, что высокая твердость после азотирования наблюдается только там, где прошла диффузия азота. На границе между зоной переплава и зоной термического влияния наблюдается резкое повышение значений микротвердости, что связано с диффузией азота по границе между зоной переплава и зоной термического влияния.

Проведенные исследования показали, что азотирование стали У10, предварительно легированной нитридообразующими элементами, приводит к некоторому снижению микротвердости упрочненного слоя. На рис. 6 представлено распределение микротвердости по толщине образцов после лазерного легирования молибденом и после лазерного легирования молибденом с последующим азотированием.

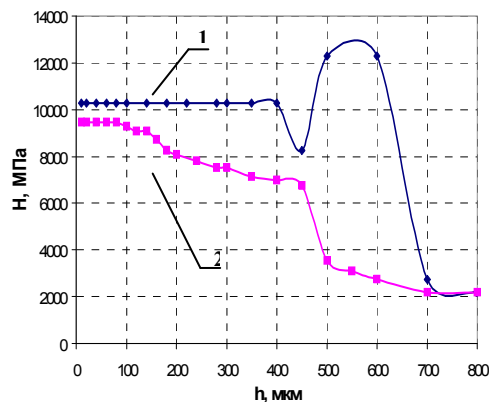


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя стали У10 после легирования молибденом в непрерывном режиме излучения $P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с – 1, и последующего азотирования при температуре 570°C в течение 6 часов – 2

Из графиков видно, что микротвердость в зоне легирования плавно уменьшается вглубь от поверхности. Кроме того, отсутствует скачкообразное повышение микротвердости в зоне термического влияния. Это связано с тем, что выдержка при температуре азотирования (570°C) приводит к распаду мартенсита на феррито-цементитную смесь, так как температура азотирования практически соответствует температуре высокого отпуска. Сходные процессы протекают и при легировании высокоуглеродистых сталей ванадием и вольфрамом (рис. 7, 8).

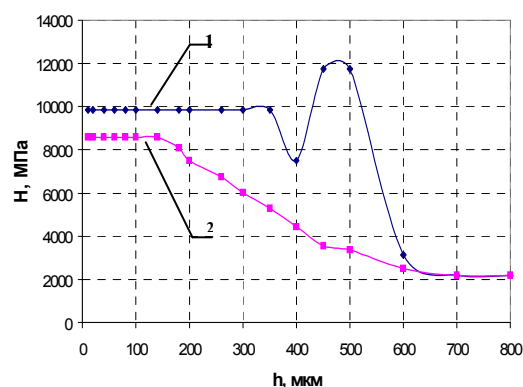


Рис. 7. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя стали У10 после легирования ванадием в непрерывном режиме излучения $P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с – 1, и последующего азотирования при температуре 570°C в течение 6 часов – 2

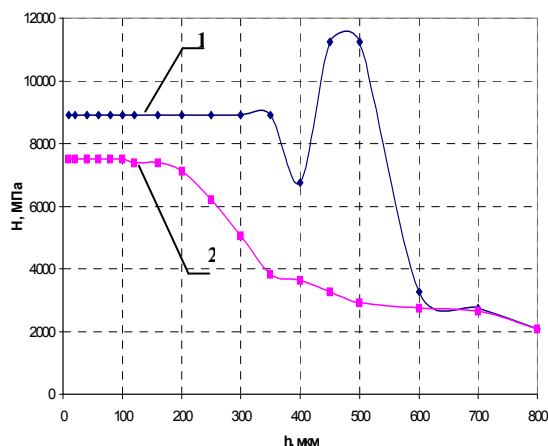


Рис. 8. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя стали У10 после легирования вольфрамом в непрерывном режиме излучения $P = 600$ Вт, $V = 10$ мм/с – 1, и последующего азотирования при температуре 570 °С в течение 6 часов – 2

В целом значения микротвердости упрочненного слоя после азотирования несколько снижаются, оставаясь достаточно высокими – на уровне микротвердости закаленной стали. Отсутствие резкого повышения микротвердости на границе между зоной переплава и зоной термического влияния означает также, что диффузии азота по границе между зоной плавления и зоной термического влияния не наблюдается, что также подтверждается металлографическими исследованиями, поскольку вблизи данной границы видимых изменений в структуре нет. Проведенные исследования прочностных свойств показали, что при увеличении скорости перемещения лазерного луча прочность и твердость увеличиваются, достигая максимальных значений при скорости $V = 15$ мм/с, а затем снижаются (рис. 9).

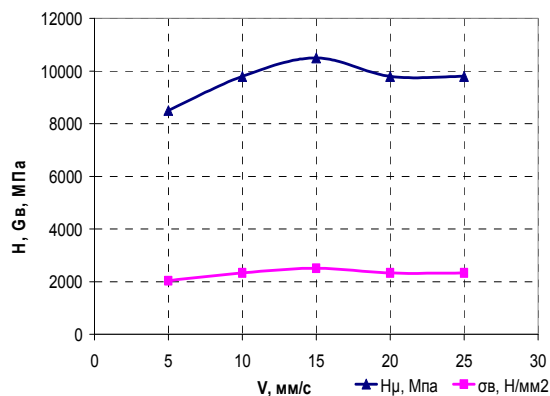


Рис. 9. Зависимость прочности и твердости от скорости перемещения лазерного луча

Причем такой характер зависимости твердости и прочности сохраняется при легировании всеми используемыми нами элементами.

Было также исследовано влияние легирующих элементов на уровень упрочнения углеродистых сталей после лазерного легирования и после лазерного легирования с последующим азотированием. Результаты представлены на рис. 10.

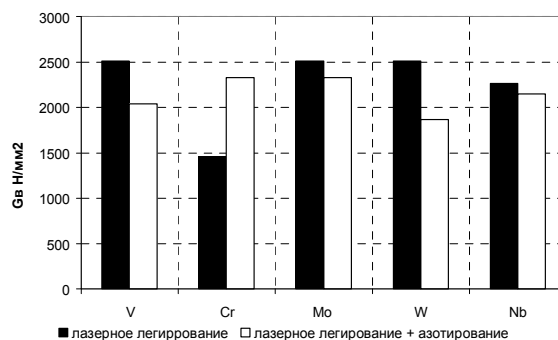


Рис. 10. Зависимость прочности и твердости от типа легирующего элемента и вида обработки

Данные исследования показали, что уровень упрочнения после комбинированной обработки несколько снижается, но при этом остается достаточно высоким.

Таким образом, комбинированная обработка высокоуглеродистых сталей, заключающаяся в лазерном легировании с последующим азотированием, позволяет получать высокую твердость на поверхности высокоуглеродистых сталей, а также устраняет неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения вблизи границы между зоной лазерного воздействия и материалом матрицы.

Выводы

1. Установлены технологические параметры лазерной обработки, позволяющие формировать на поверхности углеродистой стали легированные слои со структурой мелкозернистого перлита или мелкоиглочатого мартенсита с выделениями дисперсных карбидов.

2. Предложена комбинированная технология поверхностного упрочнения высокоуглеродистых сталей, заключающаяся в лазерном легировании с последующим азотированием, которая позволяет получать упрочненные

слои толщиной до 700 мкм с микротвердостью до 10000 МПа.

3. Проведены исследования влияния технологических параметров лазерного легирования и предложенной комбинированной технологии на прочность упрочненных слоев на углеродистых сталях.

Литература

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рентгенографическое исследование остаточных напряжений, возникающих после импульсной лазерной закалки сталей / В.С. Великих, И.Н. Воронов, В.П. Гончаренко и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1982. – № 6. – С. 138–143.
3. Origin and Development of Residual Stresses Induced by laser Surface – Hardening Treatments / Solind A., Dl. Sanctis M., Paganini L. oth. // J. Heat Treat. – 1984. – 3. – № 3. – Р. 193–204.
4. Лахтин Ю.М. Внутреннее азотирование металлов и сплавов / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган // МиТОМ. – 1974. – №3. – С. 20–28.
5. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева / О.В. Чудина. – М. : МАДИ (ГТУ). – 2003. – 248 с.
6. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.

Рецензент: Л.А. Тимофеева, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 31 августа 2011 г.