

УДК 621.78

doi 10.54708/22259309_2025_13291

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АСИММЕТРИЧНОГО ПРОКАТА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

И. Д. Склизков¹, Д. В. Мамонтов², А. В. Асылбаев³

¹ Sklizkovivan99@gmail.com, ² dany.mamontow@yandex.ru, ³ alexander.aslb@gmail.com

¹⁻³ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния интенсивной пластической деформации инструментальной стали Р6М5 на поверхностную твердость и глубину упрочненного слоя после азотирования в плазме тлеющего разряда. Результаты исследований представлены и проанализированы. В ходе анализа было установлено, что предварительная интенсивная пластическая деформация асимметричным прокатом оказывает значительное влияние на толщину упрочненного слоя.

Ключевые слова: ионное азотирование; асимметричный прокат; тлеющий разряд; упрочненный слой; быстрорежущая сталь; интенсивная пластическая деформация; материаловедение; химико-термическая обработка; микротвердость; упрочнение.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где технологии неустанно развиваются, предъявляются все более высокие требования к материалам, используемым в различных отраслях промышленности. Особое внимание уделяется стали как материалу, обладающему высокой прочностью и долговечностью. Однако для расширения ее функциональности и повышения устойчивости к агрессивным средам требуются новые методы обработки.

Именно здесь на первый план выходит ионное азотирование, перспективная технология, способная радикально улучшить механические свойства стали. Этот процесс заключается в насыщении поверхностного слоя материала атомами азота. В результате сталь приобретает целый ряд ценных качеств:

* Повышенная твердость: ионное азотирование значительно увеличивает твердость поверхности стали, делая ее более устойчивой к механическим нагрузкам, истиранию и повреждениям.

* Улучшенная износостойкость: обработанная таким образом сталь демонстрирует повышенную сопротивляемость к истиранию, продлевая срок службы изделий и снижая затраты на ремонт.

* Повышенная коррозионная стойкость: введение азота в поверхностный слой стали повышает ее устойчивость к коррозии, что особенно важно при использовании материала в агрессивных средах.

Ионное азотирование широко применяется в различных сферах, включая машиностроение, производство инструментов, медицинские изделия и авиационную промышленность. Благодаря своей эффективности и универсальности эта технология открывает новые горизонты в области обработки стали, позволяя создавать материалы, обладающие улучшенными свойствами и расширенным спектром применения [1].

Диффузия атомов в металлах – это сложный процесс, который тесно связан со структурой самого металла. Известно, что дефекты кристаллической решетки, отклонения от идеальной структуры, способствуют ускорению диффузии. Чем больше таких дефектов, тем быстрее атомы перемещаются внутри металла.

Однако, помимо структурных дефектов, на скорость диффузии влияет и размер зерна. Мелкие зерна, как правило, означают более высокую скорость диффузии.

В последнее время для увеличения скорости диффузии в металлах широко применяются методы поверхностной пластической деформации. Один из таких методов – интенсивная пластическая деформация асимметричным прокатом. При этом обрабатываемый материал имеет неодинаковую структуру или свойства в разных направлениях.

Но влияние асимметричного проката на качество ионного азотирования еще не до конца изучено. Необходимо провести дополнительные исследования, чтобы полностью разобраться в том, как этот метод влияет на свойства металлов после ионного азотирования [2].

Целью данной научной статьи является изучение влияния ионного азотирования стали Р6М5 с предварительной интенсивной пластической деформацией асимметричным прокатом на структурные и функциональные свойства. Результаты данного исследования могут быть полезными для разработки новых технологий обработки стали с применением ионного азотирования и повышения ее качества и производительности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования ионного азотирования была выбрана инструментальная сталь Р6М5, широко используемая в производстве инструментов благодаря своим высоким механическим свойствам. Для более глубокого изучения влияния интенсивной пластической деформации на характеристики упрочненного слоя после ионного азотирования была поставлена задача создать ультрамелкозернистую структуру на поверхности половины образцов.

Для достижения этой цели был выбран метод асимметричного проката. Этот метод позволяет создать неоднородную структуру в металле, где размер зерен и их расположение варьируются в зависимости от направления проката.

Образцы стали Р6М5, имеющие форму пластин с размерами 3,15x25x100 мм, были подвергнуты горячему асимметричному прокату на реверсивном стане ДУО 400 листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков. Этот стан расположен в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А. П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова» и является современным оборудованием для проведения исследований в области материаловедения (рис. 1).

Использование асимметричного проката позволило создать на поверхности образцов ультрамелкозернистую структуру, которая в дальнейшем должна влиять на характеристики упрочненного слоя после ионного азотирования. Дальнейшие исследования позволят выявить конкретное влияние такой структуры на прочность, износостойкость и другие важные свойства обработанной стали.



Рис. 1. Общий вид реверсивного стана ДУО 400 листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков

Процесс асимметричной прокатки, примененный в данном исследовании, представляет собой специфическую технологию, которая позволяет создавать неравномерную структуру в металле. Схема этого процесса представлена на рис. 2. Ключевым элементом является различие в скорости вращения верхнего и нижнего рабочих валков.

Нижний рабочий валок обладает более высокой скоростью вращения, в то время как верхний валок вращается с меньшей скоростью. Такое несоответствие в скорости приводит к тому, что металл подвергается неоднородному давлению и деформации.

Для оптимизации процесса и достижения желаемых результатов были изменены несколько параметров прокатки. В частности, температура нагрева заготовки варьировалась в диапазоне от 400 до 1100 °С. Это позволило управлять вязкостью металла и влиять на степень его деформации.

Суммарное обжатие также изменялось в пределах от 47,6 до 68,3 %. Этот параметр определяет степень сжатия металла между валками и влияет на изменение его толщины и структуры.

Количество проходов также играет значительную роль. В данном исследовании количество проходов менялось от 1 до 5. Каждый проход приводит к дополнительной деформации металла и формированию более тонкой и однородной структуры.

И, наконец, коэффициент асимметрии или коэффициент рассогласования скоростей рабочих валков варьировался в диапазоне от 1,25 до 3,33. Этот параметр определяет степень несоответствия в скорости вращения верхнего и нижнего валков и соответственно степень неоднородности деформации металла.

Прокатка осуществлялась без применения смазки, на сухих валках. Это позволяет избежать влияния смазочных материалов на структуру металла и обеспечить более точное управление процессом деформации [3–4].

Асимметричную прокатку выполняли либо за один, либо за несколько проходов. При многопроходной прокатке происходил повторный (междеформационный) нагрев заготовки до соответствующей температуры T с выдержкой 20 минут. После окончания прокатки заготовку охлаждали на воздухе.

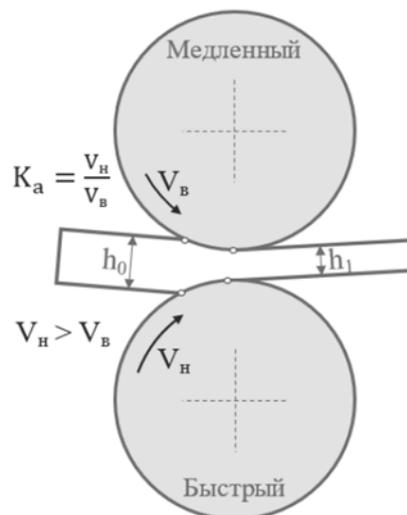


Рис. 2. Схема асимметричной прокатки (K_a – коэффициент асимметрии или коэффициент рассогласования скоростей рабочих валков; V_n – скорость нижнего валка; V_v – скорость верхнего валка)

Асимметричная тонколистовая прокатка листовых заготовок из стали Р6М5 размером $3,15 \times 25 \times 100$ мм при различных температурах (комнатной, 400°C , 500°C , 600°C , 700°C , 800°C , 1100°C) приводила к разрушению опытных образцов во всех вариациях параметров (суммарное обжатие $47,6 \dots 68,3\%$, количество проходов $1 \dots 5$, коэффициент рассогласования скоростей рабочих валков $1,25 \dots 3,33$).

Процесс ионного азотирования проводился в модернизированной вакуумной установке ЭЛУ-5М, предназначенной для проведения термической и химико-термической обработки (рис. 3).

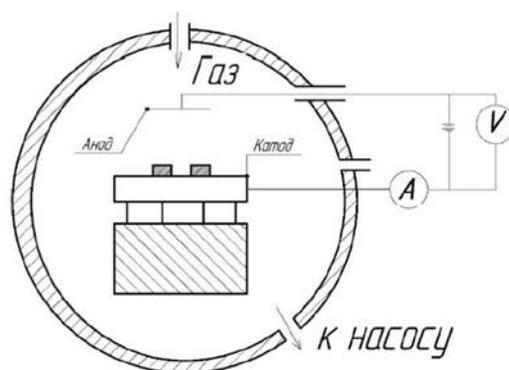


Рис. 3. Схема процесса ионного азотирования

Перед ионным азотированием образцы подвергались ионной очистке в течение 15 минут при давлении 10 Па и температуре 250°C в атмосфере аргона. Сам процесс азотирования проводился в смеси газов: 35% азота, 15% водорода и 50% аргона при давлении 200 Па.

Температурные режимы процесса были следующими: $400 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 2 и 6 часов, а также $500 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 2 и 6 часов.

После азотирования проводили измерение микротвердости и глубины упроченного слоя с помощью автоматического твердомера EMCO-Test DuraScan 50, позволяющего точно определять микротвердость материала. Исследование проводилось по методу Виккерса на наклонных шлифах.

Толщину упрочненного слоя оценивали по оптическим снимкам микроструктур, полученным с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, который позволяет получить качественные изображения для анализа.

В ходе исследования влияния интенсивной пластической деформации на поверхностную твердость и глубину упрочненного слоя стали Р6М5 после ионного азотирования были подготовлены партии образцов, прошедших асимметричный прокат при различных режимах.

Полученные данные показали, что обработка при температурах 400–800 °С не влияет на твердость стали Р6М5. Однако после асимметричного проката при температуре 1100 °С наблюдался прирост твердости более чем в 2 раза (рис. 4–5).

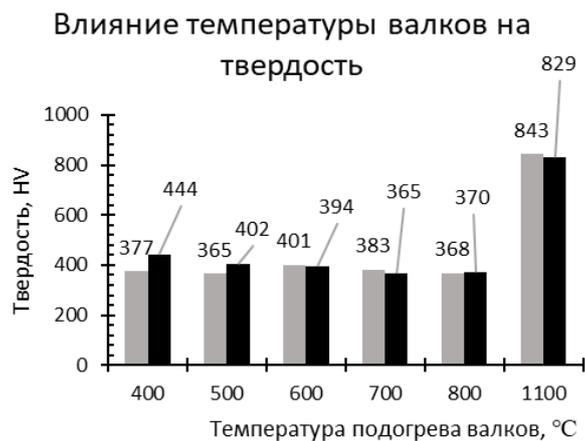


Рис. 4. Значение твердости образцов после асимметричного проката при различных температурах

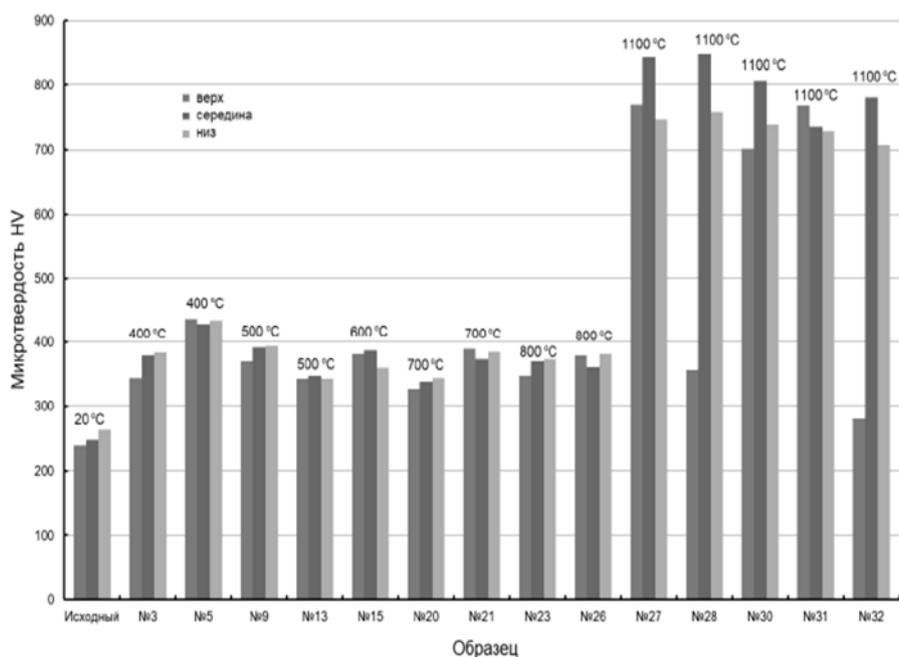


Рис. 5. Результаты измерения микротвердости HV опытных образцов, обработанных асимметричной прокаткой при разных температурах

Из-за полученных результатов было проведено исследование профиля твердости по глубине для образца, прошедшего асимметричный прокат при температуре 1100 °С. Результаты

приведены на рис. 6. Как видно из графика, повышенная твердость наблюдается лишь в центральной области образца, где происходили основные процессы деформации во время асимметричного проката.

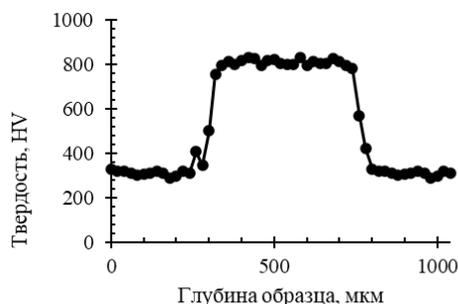


Рис. 6. Профиль твердости по глубине образца №30, прошедшего асимметричный прокат при 1100 °С

Для исследования влияния различных режимов асимметричного проката на свойства упрочненного слоя после ионного азотирования были подготовлены две партии образцов: № 30 и № 9.

Наибольшая микротвердость HV была достигнута в образцах, прошедших асимметричную прокатку при температуре 1100 °С с многопроходной прокаткой, суммарным обжатием 68,3 % за 3–5 проходов и коэффициентом рассогласования скоростей рабочих валков 1,25–2,00. В центральных слоях микротвердость HV повысилась в 3,4 раза по сравнению с исходным состоянием.

Для проведения исследовательского эксперимента были выбраны образцы, прошедшие асимметричный прокат и обладающие наилучшими характеристиками: повышенной микротвердостью и отсутствием повреждений. В качестве объектов ионного азотирования были выбраны образцы № 9 и № 30.

В процессе проведения исследования было получено распределение твердости упрочненного слоя по глубине для образцов с предварительной пластической деформацией и без нее после проведения ионного азотирования в плазме тлеющего разряда. Длительность процесса азотирования составляла $t = 2$ и 6 часов.

Полученные результаты исследования представлены на рисунках, где можно наблюдать изменение твердости упрочненного слоя в зависимости от глубины и продолжительности проведения процесса азотирования.

Из графиков можно сделать вывод, что свойства образцов, подвергнутых ионоазотированию при температуре 400 °С, практически не отличаются от образцов без азотирования. Вследствие этого дополнительные исследования были проведены на образцах, азотированных при температуре 500 °С в течение 3 и 6 часов (рис.7–8).

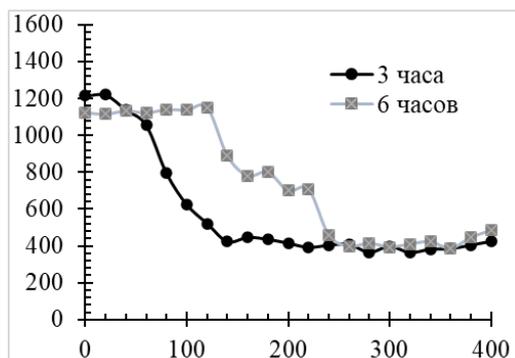


Рис. 7. Распределение микротвердости для образцов № 9, азотированных при 500 °С в течение 3 и 6 часов

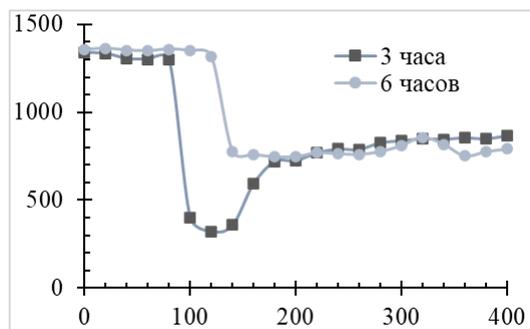


Рис. 8. Распределение микротвердости для образцов № 30, азотированных при 500 °С в течение 3 и 6 часов

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение интенсивной пластической деформации асимметричным прокатом оказывает значительное влияние на формирование структуры и свойства поверхностного слоя материала после ионного азотирования.

Ключевым фактором, объясняющим повышение поверхностной твердости, является образование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры на поверхности образцов. Эта структура характеризуется резким уменьшением размера зерен, что приводит к повышению плотности границ зерен и увеличению поверхностной свободной энергии.

Увеличенная поверхностная свободная энергия способствует повышенной адсорбции азота (насыщающего элемента) на поверхности материала. Это приводит к более интенсивному образованию нитридов в поверхностном слое, что, в свою очередь, обеспечивает увеличение поверхностной твердости.

Кроме того, интенсивная деформация асимметричным прокатом приводит к увеличению плотности дислокаций и формированию микродефектов в материале. Эти дефекты в сочетании с измельчением зерна способствуют увеличению скорости диффузии азота в глубь материала.

В результате диффузия азота происходит более эффективно, что приводит к увеличению толщины упрочненного слоя.

Таким образом, использование асимметричного проката как предварительной обработки перед ионным азотированием позволяет значительно улучшить свойства поверхностного слоя, обеспечивая повышенную твердость и увеличенную толщину упрочненного слоя [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обработки полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Предварительная интенсивная пластическая деформация асимметричным прокатом оказывает значительное влияние на толщину упрочненного слоя после 6-часового азотирования в тлеющем разряде, по сравнению с 3-часовым азотированием – увеличивая ее в 2,8 раза для образца № 9 и в 1,5 раза для образца №30.

2. Ионное азотирование в тлеющем разряде оказывает значительное влияние на микротвердость образцов:

№ 9 – микротвердость образца увеличилась с 370 HV до 1220 HV (3 часа) – в 3,3 раза и с 370 HV до 1150 HV (6 часов) – в 3,1 раза;

№ 30 – микротвердость образца увеличилась с 810 HV до 1356 HV (3 часа) – в 1,67 раза и с 810 HV до 1360 HV (6 часов) – в 1,67 раза.

Данные результаты имеют практическую значимость для разработки новых методов упрочнения материалов. Использование асимметричного проката в качестве интенсивной пластической деформации может быть эффективным способом увеличения толщины упрочненного слоя материала и увеличения микротвердости поверхности быстрорежущей стали Р6М5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Водин Д. В.** Ионное азотирование как перспективный метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента // Технические науки: теория и практика: Мат-лы III Между-нар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2016 г.). Чита: Молодой ученый, 2016. С. 95–96. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/165/982>.
2. **Осинников Е. В.** Состояние границ зерен и зернограничная диффузия в ni и nb, подвергнутых интенсивной пластической деформации: дис... д-ра физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2023. 116 с.
3. **Песин А. М., Пустовойтов Д. О., Бирюкова О. Д., Кожемякина А. Е.** Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/asimmetrichnaya-prokatka-listov-i-lent-istoriya-i-perspektivy-razvitiy>.
4. **Песин А. М., Дья Х., Кавалек А., Сжинский П., Пустовойтов Д. О., Сатонин А. В., Чуруканов А. С.** Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2014. №1 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-skorostnoy-asimmetrii-na-parametry-razlichnyh-protsesov-listovoy-prokatki>.
5. **Каченюк М. Н.** Исследование влияния различных режимов ионного азотирования на формирование поверхностного упроченного слоя быстрорежущей стали Р6М5 // Молодой ученый. 2016. № 23 (127). С. 50–54. URL: <https://moluch.ru/archive/127/35139>

ОБ АВТОРАХ

СКЛИЗКОВ Иван Дмитриевич, асп. каф. ТМ. Дипл. инженер-технолог (УГАТУ, 2020), магистр (УГАТУ, 2022). Готовит дис. о модификации поверхности быстрорежущей стали.

МАМОНТОВ Даниил Валерьевич, асп. каф. ТМ. Дипл. инженер-технолог (УГАТУ, 2020), магистр (УГАТУ, 2022). Готовит дис. о модификации поверхности быстрорежущей стали.

АСЫЛБАЕВ Александр Владиславович, ассистент каф. ТМ. Дипл. инженер (УУНИТ)

METADATA

Title: Investigation of the influence of ion nitriding and preliminary asymmetric rolling on microstructure and microhardness of sheet material made of high-speed steel HSS M2.

Author: Sklizkov I.D.¹, Mamontov D.V.², Asylbaev A.V.³

Affiliation:

¹⁻³ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ Sklikovivan99@gmail.com, ² dany.mamontov@yandex.ru, ³ alexander.aslb@gmail.com

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 91-98, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This paper presents the results of investigation of the influence of severe plastic deformation of HSS M2 tool steel on the surface hardness and depth of the hardened layer after nitriding in glow discharge plasma. The results of the research are presented and analyzed. In the course of the analysis it was found that preliminary severe plastic deformation by asymmetric rolling has a significant effect on the thickness of the hardened layer.

Keywords: ion nitriding, asymmetric rolled products, glow discharge, hardened layer, fast-cutting steel, severe plastic deformation, material science, chemical heat treatment, microhardness, strengthening

About authors:

SKLIZKOV Ivan Dmitrievich, graduate student. of the ТМ. Dipl. Technological Engineer (UGATU, 2020), Master (UGATU, 2022). Prepares dis. On the surface modification of high-speed steel.

MAMONTOV Daniil Valeryevich, graduate student of the Department of ТМ. Dipl. Technological Engineer (UGATU, 2020), Master (UGATU, 2022). Prepares a diss. About surface modification of high-speed steel.

ASYLBAEV Alexander Vladislavovich, Assistant of the Department of ТМ. Dipl. Engineer (UUST)