

УДК 621.762:71

**УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ
МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ****А.В. БЕЛЫЙ***(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск),
В.А. КУКАРЕКО, С.К. ШИХ, И.И. ТАРАН, Э.Г. БИЛЕНКО**(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)***Н.Н. ПОПОК***(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты исследований структуры, износостойкости и фазового состава штамповых сталей X12BM, X12MФ после низкоэнергетической высокоточной ионной имплантации азота при температурах обработки 650...770 К.

В последнее время поверхностное упрочнение получает широкое распространение как в странах СНГ, так и других. Одним из методов упрочнения является низкоэнергетическая высокоточная ионная имплантация азота, позволяющая при достаточно низких температурах обработки (400...500 °С) получать высокопрочный азотированный слой толщиной до 100 мкм [1 – 3]. Ионно-лучевая обработка сопровождается сильным разогревом поверхности обрабатываемого материала и генерацией в нем большого количества радиационных дефектов. Радиационно-стимулированная диффузия обеспечивает высокую скорость и глубину насыщения материалов ионами азота.

Методика исследования. Исследование проводилось на цилиндрических образцах (диаметр 10 мм, высота 6 мм), вырезанных электроискровой резкой из экспериментальных образцов упрочненных пуансонов, изготовленных из прокатанных прутков сталей X12BM и X12MФ. Ионно-лучевая обработка осуществлялась с помощью ионного источника с замкнутым дрейфом электронов. Источник генерировал азотный пучок ленточного типа длиной 120 мм и шириной 2,5 мм. При обработке использовалась система механического сканирования модифицируемых поверхностей, обеспечивающая их равномерное облучение. Имплантация проводилась в течение двух часов при энергии ионов 1...3 кэВ и плотности ионного тока 2 мА/см², что обеспечивало суммарную дозу падающих ионов примерно от 3 до 10¹⁹ см⁻². Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки составляла 620...770 К (350...500 °С). Контроль температуры осуществлялся с помощью термпары.

Твердость по Виккерсу (HV) определяли при нагрузке на индентор в 300 Н на твердомере ТП. Микротвердость (Н_μ) измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,2 и 1,0 Н. Для каждого исследуемого режима обработки проводилось не менее 10 измерений.

Рентгеноструктурный анализ структурно-фазовых превращений в модифицированных азотом слоях был выполнен на дифрактометре ДРОН-2.0. Съёмки профилей интенсивности проводили в монохроматизированном CuK_α-излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Рентгеновская съёмка осуществлялась с фокусировкой по Брегу – Brentano в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1 и временем набора импульсов на точку, равном 40 с. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека JCPDS (ASTM).

Триботехнические испытания проводились по схеме возвратно-поступательного движения на лабораторном трибометре МТВП, оснащённом специально разработанным устройством для измерения коэффициента трения [4]. Контртело изготавливалось из стали У8. Средняя скорость перемещения образца относительно контртела в процессе испытаний составляла 7 см/с. Давление испытаний – 1 МПа. Измерение величины износа осуществлялось по потере веса при испытаниях.

Обсуждение результатов

Сталь X12MФ. Сталь X12MФ в исходном состоянии (закалка и отпуск) имеет твердость HV = 6800...6900 МПа, размер аустенитного зерна примерно 20...40 мкм. Фазовый состав: мартенсит (a_α = 0,2882 нм) и частицы карбида (Fe, Cr)₇C₃.

Ионная имплантация при 650 К приводит к образованию модифицированного слоя глубиной 10...15 мкм и с микротвердостью Н_μ = 12000...13000 МПа. Основными фазами, присутствующими в азотированном слое, являются высокоазотистый нитрид ε-Fe_{2,3}N, азотистый мартенсит α_N, карбид Cr₇C₃ (рисунк, б). Кроме этого на рентгеновской дифрактограмме от поверхностного слоя модифицированной стали присутствуют слабые линии, которые могут быть отнесены к дифракционному спектру от частиц карбида Fe₃C, выделившихся в подповерхностных слоях стали. Твердость неимплантированной стали составляет 6000 МПа.

Ионная обработка рабочих вставок при 700 К сопровождается образованием модифицированного азотом слоя толщиной 15...20 мкм. Рентгеновская дифрактограмма от поверхностного слоя содержит линии от матричной α-фазы, нитридных фаз ε-Fe_{2,3}N и CrN (рисунок, в). Микротвердость слоя составляет

12500...13200 МПа. Узкий профиль дифракционных линий матричной α -фазы и малое значение периода ее кристаллической решетки ($a = 0,2877$ нм) свидетельствует о распаде азотистого мартенсита в процессе ионно-лучевой обработки при 700 К. Твердость неимплантированной стали понижается до $HV = 5700$ МПа.

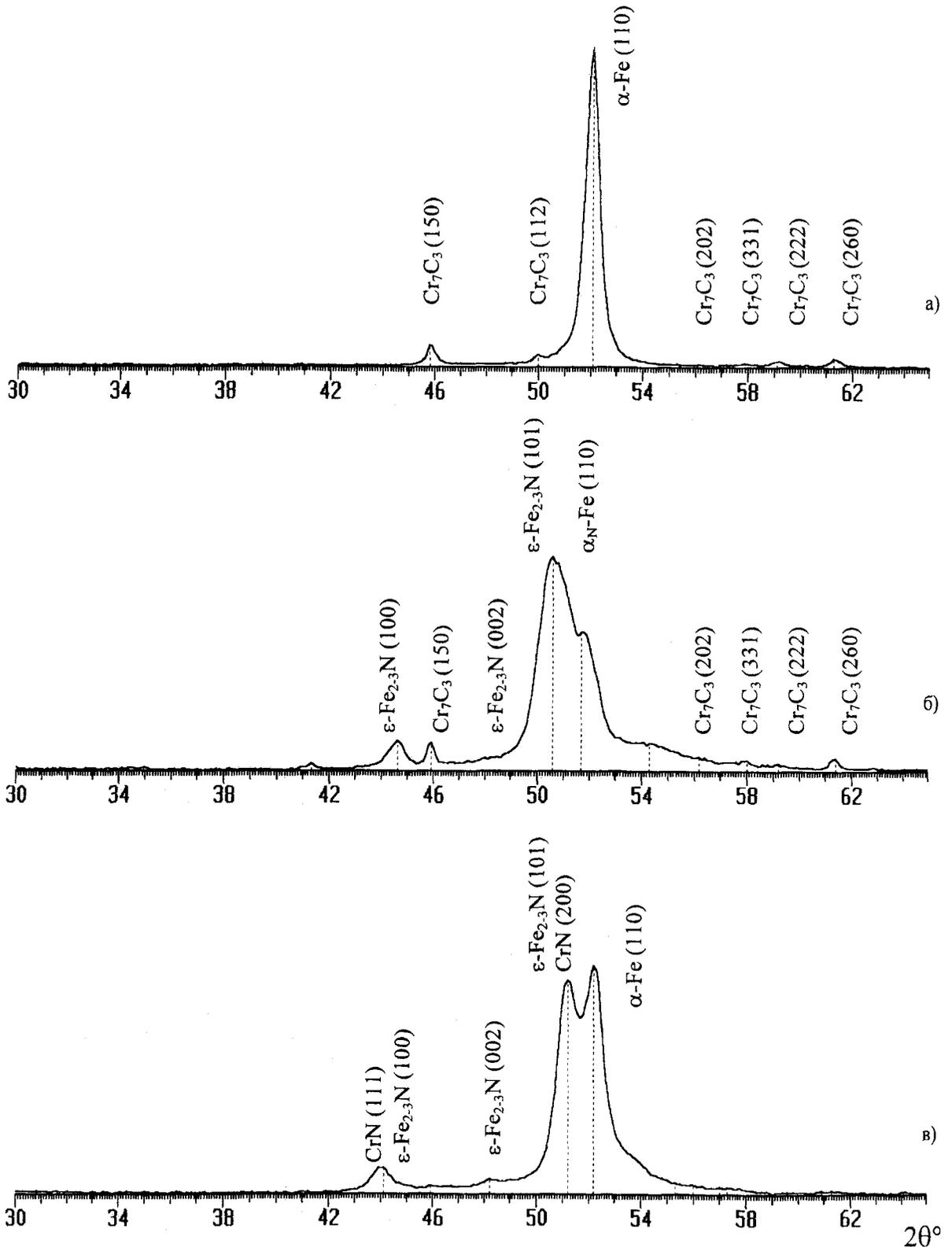


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (СоК) от поверхностных слоев стали X12МФ, обработанной по различным режимам:
а – исходное состояние (закалка и отпуск); б – имплантация N^+ при 650 К; в – имплантация N^+ при 700 К

Сталь X12BM. В исходном состоянии (закалка и отпуск) имеет твердость HV = 5900 МПа, размер аустенитного зерна ~ 20...40 мкм. Фазовый состав: мартенсит ($a_\alpha = 0,2877$ нм) и частицы карбидов (Fe, Cr)₇C₃.

Результаты измерения твердости (HV) и микротвердости (H_ц) стали X12BM после различных режимов ионной обработки представлены в табл. 1. Определение HV проводилось на неимплантированной поверхности образцов и характеризовало изменение твердости стали в процессе высокотемпературного воздействия при ионном легировании. С помощью измерения H_ц оценивалось упрочнение имплантированных поверхностей сталей. Как видно из данных таблицы, при температуре ионного легирования 620...770 К твердость стали несколько понижается. Уменьшение твердости матричной стали при обработке ионами азота может быть связано с коагуляцией карбидов и релаксацией мартенситной структуры.

Таблица 1

Микротвердость H_ц и твердость HV стали X12BM до и после ионно-лучевой обработки при различных температурах

Сталь X12BM					
Измеряемая характеристика	Режим обработки				
	Исходное состояние	Температура ионно-лучевой обработки, К			
		620	670	720	770
Микротвердость модифицированного слоя H _ц , МПа	6200	9600...10000	16000...17000	14000...15000	10000...10500
Твердость стали HV, МПа	6000	5900	6000	4600	4500

Ионная имплантация N⁺ при 620 К вызывает образование азотированных слоев глубиной до 5...10 мкм и микротвердостью H_ц = 9500...10000 МПа. Основными фазами, содержащимися в поверхностных слоях, являются карбидные фазы Fe₃C, Cr₇C₃, азотистый мартенсит, ε-Fe₃N. Дифракционные линии от матричной α-фазы размыты и смещены в сторону малых углов рассеяния, что свидетельствует о насыщении мартенсита азотом.

Имплантация ионов азота при 670 К приводит к увеличению глубины модифицированного слоя примерно до 10...15 мкм. Микротвердость слоя существенно возрастает и достигает уровня H_ц = 16000...17000 МПа. В слое регистрируются нитридные фазы ε-Fe_{2,3}N и α"-Fe₈N (см. рисунок). Интенсивность дифракционных линий от карбидных фаз сильно снижается, что свидетельствует об их растворении в процессе ионно-лучевой обработки при 670 К.

В результате обработки стали при 720 К глубина модифицированного азотом поверхностного слоя возрастает до 15...20 мкм. Микротвердость слоя составляет 14000...15000 МПа. В слое уменьшается содержание высокоазотистой фазы ε-Fe_{2,3}N и обнаруживается присутствие частиц нитридных фаз γ'-Fe₄N и CrN (см. рисунок). Частицы карбидных фаз в имплантированном азотом при 720 К слое отсутствуют. Кроме этого на рентгеновской дифракционной картине появляются линии, принадлежащие α-Fe, что указывает на процессы распада высокоазотистого ε-нитрида.

Высокотемпературное ионно-лучевое азотирование стали X12BM при 770 К приводит к образованию модифицированного слоя глубиной 20...25 мкм и с микротвердостью H_ц = 10000...11000 МПа. Основными фазами, присутствующими в азотированном слое, являются высокопрочный, термостабильный нитрид хрома CrN и α-Fe. Узкий профиль дифракционных линий матричной α-фазы и малое значение периода ее кристаллической решетки ($a = 0,2878$ нм) свидетельствует о глубоком распаде азотистого мартенсита в процессе ионно-лучевой обработки при 770 К.

Триботехнические свойства в режиме сухого трения ионно-модифицированной стали X12BM представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения интенсивности линейного износа I_л и коэффициента трения f стали X12BM после различных режимов обработки

Режим обработки	Интенсивность износа I _л , мкм/м	Коэффициент трения f
Закалка + отпуск	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,9...1,0
Имплантация N ⁺ , T = 620 К	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,9...1,1
Имплантация N ⁺ , T = 670 К	$0,8 \cdot 10^{-2}$	1,0...1,2
Имплантация N ⁺ , T = 720 К	$0,2 \cdot 10^{-2}$	1,1...1,2
Имплантация N ⁺ , T = 770 К	$0,1 \cdot 10^{-2}$	0,9...1,1

Из представленных в табл. 2 данных видно, что низкоэнергетическое ионно-лучевое азотирование стали X12BM при 720...770 К приводит к существенному увеличению износостойкости ее поверхностных слоев. С увеличением температуры ионно-лучевой обработки, т.е. с увеличением толщины модифицированного слоя интенсивность износа I_n уменьшается до значения $0,1 \cdot 10^{-2}$ мкм/м.

Заключение. Исследовано структурное состояние и фазовый состав штамповых сталей X12BM и X12MФ, подвергнутых низкоэнергетической ионно-лучевой обработке азотом. Показано, что ионная имплантация приводит к образованию модифицированных слоев толщиной от 5 до 25 мкм и микротвердостью 10...17 ГПа. Установлено, что при наличии разных легирующих элементов в данных сталях, после азотирования выделяются одинаковые нитридные фазы ϵ -Fe_{2,3}N и α "-Fe₈N, которые и увеличивают твердость поверхностного слоя. Износостойкость стали после обработки при температурах 720...770 К увеличивается примерно в 15 раз.

Работа выполнена в рамках задания региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области» № 01.12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А.В. Белый, В.А. Кукареко, О.В. Лободаева и др. – Мн.: Изд-во Физико-технического института НАН Беларуси, 1998. – 218 с.
2. Wilbur P.J., Buchholtz B.W. Engineering tribological surfaces by ion implantation // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Т. 79. – Р. 1 – 8.
3. Wei R. Low energy, high current density ion implantation of materials at elevated temperature for tribological applications // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Т. 83. – Р. 218 – 227.
4. Белый А.В., Кукареко В.А., Бояренко И.В. Триботехнические характеристики мартенситных коррозионных сталей, подвергнутых ионно-лучевой обработке азотом // Трение и износ. – 1999. – Т. 20, № 4. – С. 378 – 387.
5. Влияние плотности ионного тока на структурные параметры и свойства поверхностных слоев хром-содержащих сплавов железа, модифицированных ионами азота А. В. Белый, В.А. Кукареко, И.Ю. Тарасевич, С.К. Ших, И.В. Бояренко // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 11 – 17.
6. Фазовые и структурные превращения в материалах на основе железа, подвергнутых низкоэнергетической имплантации азотом при высоких плотностях тока / А. В. Белый, В.А. Кукареко, О.В. Лободаева, С.К. Ших // ФММ. – 1995. – Т. 80. Вып. 6. – С. 82 – 95.