

УДК 539.1.06:539.23.234

О. Г. Бобрович, кандидат физико-математических наук, доцент (БГТУ);
И. С. Ташлыков, доктор физико-математических наук, профессор (БГПУ);
В. В. Тульев, кандидат физико-математических наук, доцент (БГТУ)

МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ МАРОК 40X, 45 И Ст3, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ОСАЖДЕНИЕМ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ АССИСТИРОВАНИЯ ИОНАМИ ТИТАНА И КРЕМНИЯ

В данной работе исследована микротвердость структур покрытие – сталь марок Ст3, 45, 40X, сформированных осаждением тонких покрытий Ti и Ti + Si в условиях ассистирования ионами Ti^+ и $(Ti + Si)^+$ соответственно. Установлено, что ионно-ассистируемое осаждение покрытий Ti и Ti + Si приводит к увеличению микротвердости образцов из сталей 45, 40X в 1,5–2 раза. Обсуждены возможные причины, приводящие к изменению микротвердости модифицированных сталей.

In the given work microhardness of structures covering – steel St3, 45, 40X marks, thin coverings Ti generated by sedimentation and Ti + Si in conditions assisted by ions Ti^+ and $(Ti + Si)^+$, accordingly is investigated. It is established that ionic-assisted sedimentation of coverings Ti and Ti + Si leads to increase in microhardness of samples from steels 45, 40X in 1,5–2 times. In work the possible reasons leading to change of microhardness of modified steels are discussed.

Введение. Введение атомов в виде пучка ускоренных ионов с некоторой энергией вызывает в материале как химические, так и физические изменения. Дефекты, обусловленные бомбардировкой ионами высоких энергий, могут взаимодействовать как с матрицей, так и с имплантированными ионами. И то и другое меняет свойства поверхности. Ионно-лучевые методы находят свое применение и для модификации поверхностных слоев твердых тел с целью улучшения их физико-химических свойств. Ряд очень важных свойств материала, таких как износ, упрочнение, коррозионная стойкость, электрохимические и каталитические свойства, сцепление, адгезия, могут сильно меняться в зависимости от состава и структуры поверхностного слоя материала [1–4]. В данной работе изучалась микротвердость структур покрытие – сталь, сформированных методом ионно-ассистируемого осаждения тонких покрытий [5], которая является одним из важных и удобных с точки зрения практического контроля параметром изменяющихся прочностных свойств модифицированной поверхности изделий.

Методика эксперимента. Эксперименты по ионно-ассистируемому осаждению тонких покрытий проводились с использованием вакуумного резонансного плазменно-дугового источника, который одновременно генерирует как нейтральный поток частиц, так и поток положительных ионов. Образцы для нанесения покрытий методом ионно-ассистированного осаждения изготавливались из сталей марок Ст3, 45 и 40X в виде цилиндров толщиной 5 мм и диаметром 10 мм, которые шлифовались на

наждачном круге разной зернистости, а затем подвергались полированию с применением окиси хрома и алмазных паст до оптического класса чистоты. После полировки образцы отжигались при 900°C в течение 1,5 ч и охлаждались на воздухе. Непосредственно перед ионно-ассистированным нанесением покрытий проводилась чистка поверхности образцов ионами воздуха (азот, кислород) на протяжении 5 мин. Вакуум в мишенной камере при нанесении покрытий составлял $\sim 10^{-2}$ Па. На подготовленные образцы наносились покрытия Ti или Ti + Si в условиях ассистирования ионами Ti^+ или $(Ti + Si)^+$ при ускоряющем напряжении 15 кВ. Интегральный поток ассистирующих ионов менялся от $1,8 \cdot 10^{16}$ до $3,1 \cdot 10^{16}$ см⁻². Рассчитанные скорости осаждения тонких металлосодержащих покрытий составляли от 0,3 до 0,9 нм/мин.

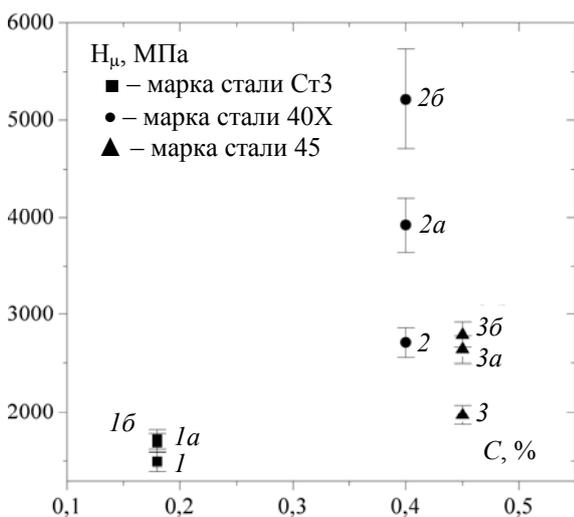
Измерение микротвердости образцов сталей разных марок, модифицированных и исходных, осуществлялось на приборе ПМТ-3 методом Виккерса. Чтобы исключить влияние масштабного эффекта, относительное изменение микротвердости модифицированных образцов $\Delta H_{\mu} / H_{\mu}$ определялось для одинаковых глубин проникновения индентора. Нагрузка на индентор, изготовленный в виде алмазной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$, составляла 1 Н, что соответствовало глубине проникновения индентора $(5,5 \pm 0,3)$ мкм. Проводили 15 измерений диагонали отпечатка алмазной пирамиды на одном образце, по которым рассчитывали среднее значение микротвердости H_{μ} и погрешность измерения ΔH_{μ} сл, которая составляла ~ 5 –10%.

Таблица 1

Числа микротвердости H_{μ} сталей разных марок до и после осаждения титановых покрытий в условиях ассистирования ионами титана Ti^{+}

Марка стали	Доза ионов, $\times 10^{16} \text{ см}^{-2}$	H_{μ} , МПа	$\Delta H_{\mu \text{ сл}}$, МПа	ϵ , %	$\frac{H_{\mu}^{\text{обл}} - H_{\mu}^{\text{исх}}}{H_{\mu}^{\text{исх}}}$, %
Ст 3	Исходный образец	1494	97	7	—
	1,8	1682	95	6	13
	3,1	1715	99	6	15
45	Исходный образец	1969	97	5	—
	1,8	2638	139	5	34
	3,1	2790	128	5	42
40X	Исходный образец	2709	151	6	—
	1,8	3923	284	7	45
	3,1	5222	511	10	93

Результаты и обсуждение. Сравнительные данные об изменении микротвердости сталей разных марок, модифицированных ионами титана различными дозами, приведены в табл. 1. При внедрении дозы $1,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ионов титана в образцы сталей относительное изменение твердости больше у стали марки 40X (~45%), в то время как в стали марки 45 увеличение твердости составляет ~30%, а в Ст3 – всего ~10%. При возрастании дозы имплантированных ионов Ti^{+} до $3,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в сталь марки 40X относительное изменение микротвердости составляет уже ~90%, слабо изменяется в стали марки 45 (~40%) и практически не изменяется в Ст3. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при внедрении ионов Ti^{+} в сталь достигается увеличение относительного изменения твердости по мере усиления ее легирования углеродом и далее хромом (рисунок).



Зависимость микротвердости образцов стали, модифицированных ионами Ti^{+} , от содержания углерода в стали. Исходные образцы: 1, 2, 3. Модифицированные образцы: дозой $1,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – 1а, 2а, 3а и дозой $3,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – 1б, 2б, 3б

Отчасти данный эффект можно связать с наличием в исходных образцах легирующей примеси, которая совместно, наряду с имплантированным титаном, способствует закреплению дислокаций, образующихся в процессе испытания образцов на твердость.

Увеличение значений микротвердости поверхности сталей марок Ст3, 45, 40X с возрастанием интегрального потока ассистирующих ионов при осаждении покрытий мы объясняем тем, что при этом увеличивается время осаждения покрытий, а следовательно, и толщина нанесенного покрытия. Поэтому происходит возрастание объемной доли упрочняющих фаз в покрытии, что приводит к увеличению микротвердости модифицированной поверхности стали.

Анализируя числа микротвердости для исходных и модифицированных образцов, необходимо также отметить, что в пределах одного образца микротвердость отдельных фаз и зерен может изменяться на ~70%. Это свидетельствует о неоднородности модифицированной поверхности, наличии на ней различных фаз (например, силицидов или карбидов) с различной микротвердостью. Данные об относительном изменении микротвердости стали марки 40X после ионно-ассистированного осаждения ($Ti + Si$)-покрытий в зависимости от интегрального потока ассистирующих ионов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Числа микротвердости H_{μ} стали марки 40X до и после осаждения титановых и титан-кремниевых покрытий в условиях ассистирования ионами титана Ti^{+} и $(Ti + Si)^{+}$

Доза ионов, $\times 10^{16} \text{ см}^{-2}$	Микротвердость стали марки 40X, МПа, в зависимости от ассистирования ионами	
	$(Ti + Si)^{+}$	Ti^{+}
Исходный образец	2709 ± 151	2709 ± 151
1,8	2950 ± 110	3923 ± 284
3,1	4110 ± 250	5222 ± 511

Осаждение титановых покрытий способствует большому возрастанию микротвердости, чем при осаждении титан-кремниевых покрытий. Это связано с тем, что при осаждении титана с кремнием самого титана в покрытии меньше, а это приводит к меньшему содержанию упрочняющих карбидов титанов в приповерхностных слоях.

Увеличение микротвердости поверхности стали при ионно-ассистированном осаждении покрытий, по нашему мнению, обусловлено тем, что в приповерхностной области образца стали формируются слои с повышенными прочностными свойствами вследствие образования в них оксикарбидных фаз [5] и структурных дефектов [6], а также твердорастворного упрочнения, обусловленного присутствием атомов легирующих элементов в железе [4].

Заключение. Результаты, полученные при исследовании микротвердости поверхности сталей, модифицированных ионно-ассистированным осаждением, обусловлены процессами упрочнения за счет образования оксидных и карбидных фаз, твердорастворного упрочнения, связанного с присутствием атомов легирующих элементов в железе, а также структурных радиационных дефектов, формирующихся в процессе модифицирования образцов стали. Осаждение титановых покрытий приводит к большому возрастанию микротвердости, чем при осаждении титан-кремниевых покрытий. Это обусловлено тем, что при осаждении титана с кремнием самого титана в покрытии меньше, а это приводит к меньшему содержанию упрочняющих карбидов титанов в приповерхностных слоях. Микротвердость модифицированных образцов стали марки 40Х увеличилась в 1,5–2 раза. Для стали марки 45 микротвердость выросла в 1,5 раза, а для стали марки Ст3 микротвердость увеличи-

лась всего на ~10% при аналогичных режимах модифицирования образцов стали.

Литература

1. Комаров, Ф. Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела / Ф. Ф. Комаров, А. Ф. Комаров. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 392 с.
2. Оджаев, В. Б. Ионная имплантация полимеров / В. Б. Оджаев, И. П. Козлов, В. Н. Свиридов. – Минск: Белгосуниверситет, 1998. – 197 с.
3. Углов, В. В. Трибологические свойства углеродных покрытий, осажденных на алюминий / В. В. Углов, Н. Н. Черенда, А. К. Кулешов // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы III Международ. науч. конф., Минск, 6–8 окт. 1999 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1999. – Ч. 2. – С. 270–272.
4. Анищик, В. М. Структурно-фазовая стабильность дисперсионно-твердеющего сплава Д16 при высокоэнергетической имплантации ионов криптона / В. М. Анищик, С. И. Жукова, Л. А. Васильева // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы III Международ. науч. конф., Минск, 6–8 окт. 1999 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1999. – Ч. 2. – С. 13–15.
5. Тульев, В. В. Ионно-ассистированное осаждение покрытий на Fe, Al и сплавы сталь 45, сталь 40Х, АЛ4: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / В. В. Тульев; Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2004. – 23 с.
6. Гольцев, М. В. Радиационное упрочнение ОЦК и ГЦК металлов при облучении тяжелыми высокоэнергетическими ионами / М. В. Гольцев, А. Хофман // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы III Международ. науч. конф., Минск, 6–8 окт. 1999 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1999. – Ч. 2. – С. 42–43.

Поступила 28.02.2012