



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>
УДК 621.785.53

Поступила 15.11.2020
Received 15.11.2020

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРСТОЙКОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ НАСЫЩЕНИЕМ И НАНЕСЕНИЕМ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

*А. В. КОВАЛЬЧУК, Е. К. ПАЦЕКО, Г. А. ТКАЧЕНКО, Н. А. ВЕРЕЩАК,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: a-v-kov@yandex.com, kate.patseko@mail.ru*

В данной статье обоснована гипотеза о возможности повышения жаростойкости доэвтектоидных углеродистых сталей путем предварительного термодиффузионного легирования с последующим нанесением вакуумных нитридных покрытий. Установлено, что наибольшей жаростойкостью, определяемой по относительному приросту массы, обладают термодиффузионные слои, полученные в результате бороалитирования, далее в порядке уменьшения жаростойкости: слои, полученные в результате боросилицирования, борохромирования, бороазотирования и борирования. Разработаны новые составы жаростойких покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие», которые также являются твердыми, износостойкими, коррозионностойкими в условиях атмосферной коррозии, растворах солей и некоторых кислот. Проведена оценка влияния ионно-плазменных покрытий на дополнительное повышение жаростойкости сталей с полученными термодиффузионными слоями, в ходе которой определены и приведены наиболее эффективные составы разработанных покрытий для повышения жаростойкости поверхности. Приведены результаты расчета прогнозной жаростойкости разработанных композиций «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие» на углеродистых доэвтектоидных сталях.

Ключевые слова. Термодиффузионное насыщение, жаростойкость, вакуумное ионно-плазменное покрытие, бороалитирование, коррозионная стойкость.

Для цитирования. Ковальчук, А. В. Повышение жаростойкости углеродистых сталей термодиффузионным насыщением и нанесением вакуумных покрытий / А. В. Ковальчук, Е. К. Пацек, Г. А. Ткаченко, Н. А. Верещак // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 139–147. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>.

INCREASE IN THE HEAT RESISTANCE OF CARBON STEELS BY THERMODIFFUSION TREATMENT AND VACUUM COATING APPLICATION

*A. V. KOVALCHUK, E. K. PATSEKO, G. A. TKACHENKO, N. A. VERESHCHAK,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: a-v-kov@yandex.com, kate.patseko@mail.ru*

In this article is substantiated the hypothesis of the possibility of increasing the heat resistance of hypoeutectoid carbon steels by preliminary thermal diffusion alloying followed by the application of vacuum nitride coatings. It was established that thermal diffusion layers obtained as a result of saturation with boron and aluminum have the greatest heat resistance in terms of relative mass gain, then in order of decreasing heat resistance: layers obtained as a result of saturation with boron and silicon, boron and chromium, boron and nitrogen, and as a result of boriding. New composite coatings of heat-resistant compositions “thermodiffusion layer – vacuum ion-plasma coating” have been developed, which are also solid, wear-resistant, and corrosion-resistant under atmospheric corrosion, solutions of salts and certain acids. The influence of ionic-plasma coatings on additional increase in heat resistance of steels with the produced thermodiffusion layers, during which the most efficient compositions of the developed coatings are defined and given to improve the temperature resistance of the surface, was assessed. The results of the calculation of the predicted heat resistance of the developed compositions “diffusion layer – ion-plasma coating” on hypoeutectoid carbon steels are given in the article.

Keywords. Thermochemical treatment, diffusion layer, heat resistance, vacuum ion-plasma coating, corrosion resistance, saturation powder mixture.

For citation. Kovalchuk A. V., Patseko E. K., Tkachenko G. A., Vereshchak N. A. Increase in the heat resistance of carbon steels by thermodiffusion treatment and vacuum coating application. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 139–147. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-139-147>

Введение

Вакуумные ионно-плазменные покрытия широко применяются в различных областях техники [1]. В последние годы в инженерии поверхности сформировалась концепция повышения долговечности вакуумных покрытий путем дополнительного термодиффузионного упрочнения стальной основы [2–4]. Разработанные композиционные слои обладают высоким комплексом трибомеханических характеристик [5]. Есть основания полагать, что указанный комплексный подход может быть эффективен для обеспечения других защитных свойств, в частности жаростойкости конструкционных углеродистых сталей.

Жаростойкость стальных деталей с вакуумными ионно-плазменными покрытиями на базе традиционных систем (Ti-Al-N, Ti-Al-C-N, Ti-Al-Si-N, Cr-Ti-N и др.) не всегда полностью определяется защитными свойствами самих покрытий [1–4]. Протекание процессов структурной деструкции может иметь место под покрытием – в стальной подложке, при отсутствии визуальных признаков на поверхности детали. Отсутствие развитой когезионной связи покрытия со стальной подложкой, а также существенная разница в кристаллической природе нитридного покрытия и стальной основы способствуют подповерхностному окислению.

Одним из наиболее эффективных способов повышения жаростойкости поверхности сталей является их химико-термическая обработка, которая позволяет сформировать на поверхности когезионно-связанный с основным сплавом жаростойкий диффузионный слой. Эффективными и наиболее изученными процессами термодиффузионного насыщения, повышающими жаростойкость сталей и сплавов на основе железа, являются силицирование, алитирование, хромирование, боросилицирование, борохромирование, бороалитирование, в меньшей степени – бороазотирование, а также менее распространенные и технологичные процессы – вольфрамирование, ванадирование, титанирование, а также процессы многокомпонентного насыщения такими элементами, как V, W, Mo, Ti, Cr и др. [6–13].

В данной работе реализована гипотеза о возможности повышения жаростойкости углеродистых конструкционных сталей с вакуумными нитридными покрытиями путем предварительного термодиффузионного насыщения рядом легирующих элементов поверхности стали, а также предложены составы новых жаростойких покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие».

Материалы и методики исследования

Химико-термическую обработку (ХТО) проводили в порошковых насыщающих средах. Для проведения процессов ХТО использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Насыщение проводили в порошковых средах в контейнерах, герметизируемых плавким затвором. Исходная микроструктура стальных образцов перед ХТО представляла собой квазиравновесную, полученную в результате нормализации. Поверхность образцов перед ХТО обезжиривали, шероховатость R_a поверхности образцов перед ХТО не превышала значений 3,0–3,2 мкм. Вакуумные нитридные покрытия на сталях получали реактивным магнетронным нанесением.

Распределение микротвердости по толщине термодиффузионных слоев определяли на микрошлифах с углом среза к поверхности 45° с шагом 5–20 мкм, расстоянием между дорожками измерения не менее 30–40 мкм, количество измерений на точку – 3.

Жаростойкость оценивали по методике, приведенной в ГОСТ 6130-71, скорректированной с учетом времени и температуры разогрева подложек при реактивном магнетронном нанесении на них ионно-плазменных покрытий, а также с учетом традиционных температур работы ионно-плазменных покрытий на базе нитрида и алюмонитрида титана, составляющих 400–700 °С. Для исследования жаростойкости применяли плоские образцы размерами 3×30×45 мм. Грани образцов были скруглены радиусом не менее 1 мм. Температура проведения испытаний – до 700 °С, время испытаний – 10 ч. Для испытаний на жаростойкость использовали камерную печь без защитной атмосферы СНОЛ-1,6,2,5.1/11-И2М. Образцы загружали в печь, разогретую до температуры испытаний. Началом испытания считали момент достижения в рабочей зоне печи заданной температуры после загрузки образцов, концом испытаний – момент выключения печи. Перед испытанием тигли были прокалены до постоянной массы, использовали керамические тигли, не препятствующие проникновению окислительной атмосферы и обеспечивающие сохранение возможных осыпавшихся оксидов. Жаростойкость оценивали сравнением величины относительного набора массы образцов после испытания. Изменение массы образцов определяли по разности результатов взвешивания холодных образцов до испытания и взвешивания после охлаждения образцов в тиглях, предварительно закрытых крышками из жаростойкого материала. Измерения проводили на аналитических весах RADWAG AS 310/X, погрешность $\pm 0,0005$ г.

Результаты и их обсуждение

В результате ХТО были получены диффузионные боридные, силицированные, боросилицированные, бороалитированные, борохромированные и бороазотированные термодиффузионные слои общей толщиной 60–230 мкм и микротвердостью поверхности 6920–15800 МПа (табл. 1). Толщину термодиффузионных слоев определяли как расстояние от поверхности образца, на котором происходит резкое падение микротвердости, либо по наличию характерной границы, разделяющей компактный монофазный или многофазный слой на поверхности и переходную зону или зону внутреннего насыщения.

Таблица 1. Характеристики полученных диффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях в результате различных видов ХТО

Вид ХТО	Температура насыщения, °С	Время выдержки, ч	Общая толщина диффузионного слоя, мкм	Микротвердость поверхности, МПа
Борирование	930	6	200–230	14600–15800
Силицирование	1000	4	60–80	—*
Бороазотирование	950	4	80–100	9200–11300
Борохромирование	950	4	80–90	8400–10050
Бороалитирование	1000	4	100–120	6920–8460
Боросилицирование	920	6	90–100	8040–8860

* Пористая поверхность.

Полученные термодиффузионные слои имели традиционное строение (рис. 1), согласующееся с результатами работ [7–16]. При этом следует отметить, что в результате силицирования образовался диффузионный слой с высокой пористостью поверхности, что не позволяет корректно оценить микротвердость поверхности и построить распределение микротвердости по толщине слоя из-за занижения значений микротвердости в приповерхностной пористой зоне и малой общей толщины полученного силицированного слоя. В результате борохромирования на поверхности образуется не сплошной диффузионный слой, бороазотированный слой также имеет участки «пятнистой» микротвердости.

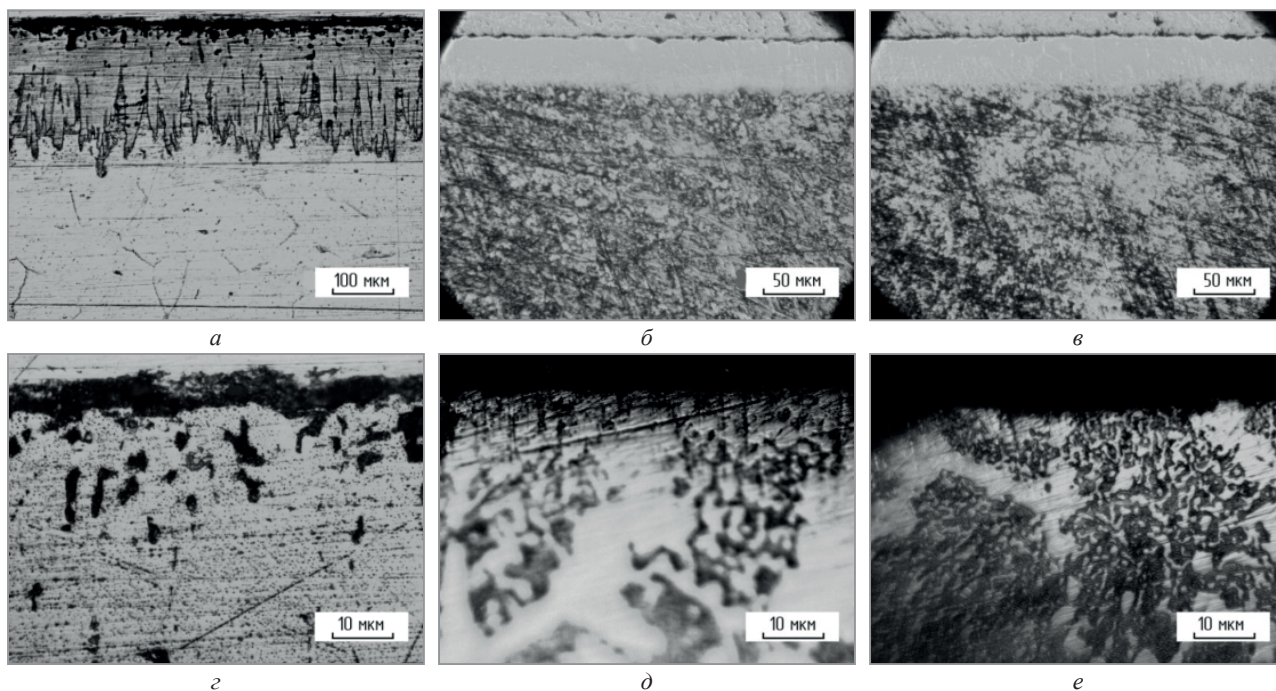


Рис. 1. Микроструктура термодиффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях, полученных в результате борирования (а), бороазотирования (б), борохромирования (в), бороалитирования (г), боросилицирования (д) и силицирования (е) в порошковой среде

Как известно, распределение микротвердости по толщине двухфазного диффузионного боридного слоя является ступенчатым с протяженными участками постоянной микротвердости, равными длине боридных игл фаз Fe_3B с поверхности и Fe_2B ближе к основе, под которыми располагается подборидная

зона [7]. Такое распределение микротвердости обеспечивает наибольшую эффективную толщину упрочненного слоя подложки в системе «диффузионный слой – покрытие» по сравнению с другими термодиффузионными слоями. Важно, что боридный слой и покрытия на базе систем Ti-N и Ti-Al-N, наносимые в условиях среднего или сильного вакуума, будут иметь схожую столбчатую морфологию (иглоподобное строение для боридного слоя) [1, 8].

Распределение микротвердости по толщине бороазотированного, бороалитированного, борохромированного и боросилицированного диффузионных слоев (рис. 2) по сравнению с боридным слоем отличается отсутствием участка с постоянной микротвердостью в приповерхностной зоне, а также является более плавным и не имеет резких перепадов микротвердости, что связано с большей дисперсностью структуры диффузионных слоев и связанным с этим равномерным уменьшением объемного количества упрочняющих фаз на основе боридов железа в направлении от поверхности образца к сердцевине. В сочетании с высокотвердым вакуумным ионно-плазменным покрытием такое распределение микротвердости по толщине слоев должно обеспечить высокие демпфирующие свойства стальной подложки, возможно, позволит частично релаксировать термические напряжения при высокотемпературной эксплуатации стального изделия.

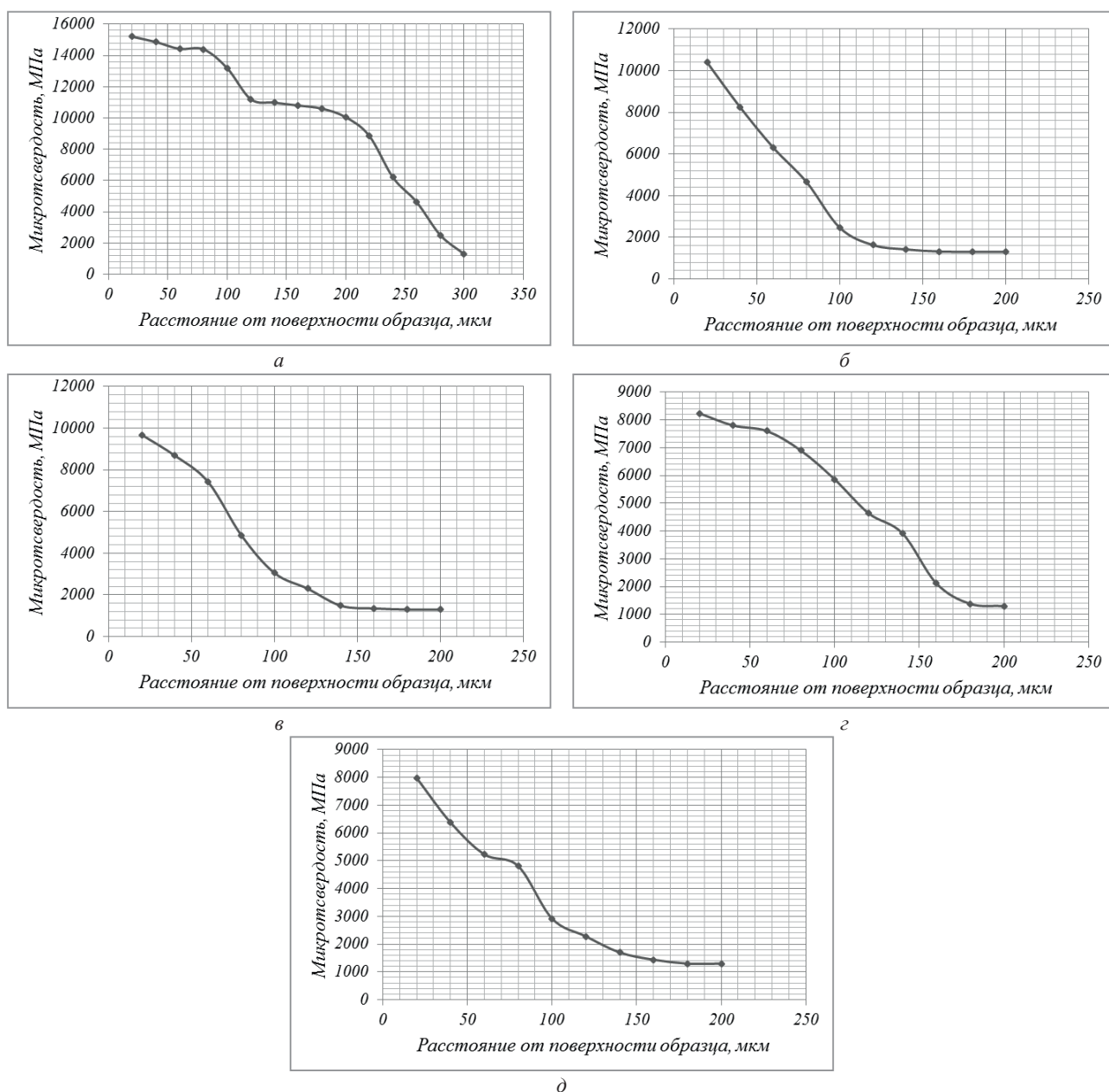


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине полученных термодиффузионных слоев на углеродистых доэвтектоидных сталях после различных видов ХТО:
а – борирование; б – бороазотирование; в – борохромирование; г – бороалитирование; д – боросилицирование

Первоначально были проведены исследования жаростойкости стальных образцов (сталь 10) только с термодиффузионными слоями. Установлено, что наибольшей жаростойкостью, определяемой по относительному приросту массы, обладают термодиффузионные слои, полученные в результате бороалитирования. Далее в порядке уменьшения жаростойкости: слои, полученные в результате боросилицирования, борохромирования, бороазотирования и борирования (рис. 3). Наибольшая жаростойкость бороалитированного термодиффузионного слоя связана, как известно, с образованием алитированного слоя на основе алюминидов железа $FeAl$ и Fe_3Al [17, 18], на что указывает микротвердость поверхности бороалитированного слоя на уровне 6920–8460 МПа и расположенного под ним слоя иглообразных кристаллов на основе боридов железа. Кроме того, стальные образцы, подвергнутые бороалитированию, имели тонкий сплошной оксидный слой, хорошо сцепленный с поверхностью, который скалывался лишь частично в процессе микроиндентирования вокруг отпечатка индентора. Тонкий оксидный слой на поверхности бороалитированных образцов также мог способствовать более медленному их окислению [19, 20].

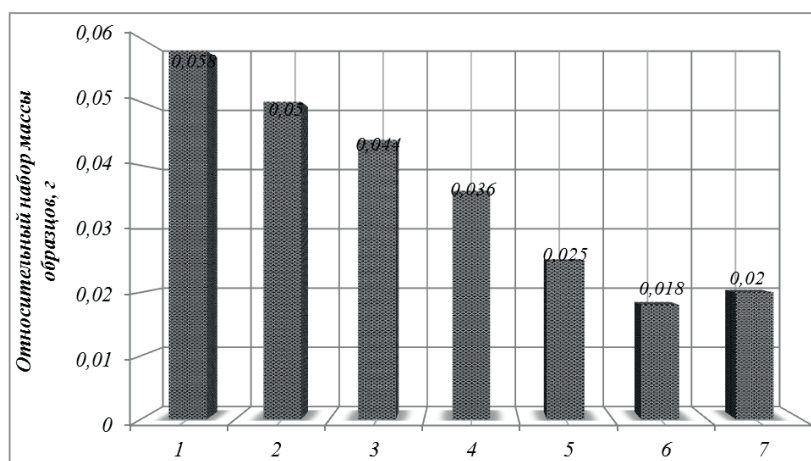


Рис. 3. Результаты оценки жаростойкости образцов из стали 10, подвергнутых различной химико-термической обработке: 1 – нормализация; 2 – борирование; 3 – силицирование; 4 – бороазотирование; 5 – борохромирование; 6 – бороалитирование; 7 – боросилицирование

Повышение жаростойкости стальных образцов в результате бороалитирования при испытаниях 700 °С, 10 ч в атмосфере воздуха составило 68% по сравнению с нормализованными образцами и 40% по сравнению с борированными образцами. Следует полагать, что при традиционной продолжительности проведения испытаний на жаростойкость (50, 100, 200 ч и более) повышение жаростойкости в результате бороалитирования в сравнении с нормализованными и борированными образцами будет более существенным.

На следующем этапе были проведены исследования жаростойкости стальных образцов с вышеуказанными термодиффузионными слоями с дополнительным нанесением вакуумных нитридных слоев (табл. 2). Составы ионно-плазменных покрытий для нанесения их на стальные подложки с термодиффузионным жаростойким слоем выбирали исходя из наибольшей температуры окисления покрытий среди аналогичных нитридных и карбонитридных систем, а также с учетом возможности протекания процессов вторичного структурообразования для дополнительного повышения адгезии покрытий и механических свойств на границе покрытие-подложка.

Таблица 2. Разработанные составы жаростойких композиций на основе термодиффузионных слоев на сталях и вакуумных ионно-плазменных покрытиях

Тип диффузионного слоя	Толщина диффузионного слоя, мкм		Тип вакуумного покрытия	Толщина вакуумного покрытия, мкм
	общая	зона химического соединения		
Борирование	200–230	150–160	TiAlN, TiCN	1–7
Силицирование	60–80	45–60*	TiAlN, TiAlSiN	1–4
Бороазотирование	80–100	30–50	TiAlN, TiAlCN	1–7
Борохромирование	80–90	25–40	CrN, TiAlN, TiAlCrYN	1–7
Бороалитирование	100–120	60–80	TiAlN, TiCN, TiAlSiN	1–7
Боросилицирование	90–100	15–40	TiAlN, TiAlSiN	1–4

* Пористая структура.

На основе анализа результатов жаростойкости диффузионных слоев и данных об окалиностойкости рассматриваемых ионно-плазменных покрытий с уровнем их гидростатической плотности и кислородной проницаемости при традиционной толщине покрытий 1–3 мкм до температуры 700 °С [1, 5, 20–22] была проведена прогнозная оценка жаростойкости предложенных покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – ионно-плазменное покрытие», получаемых в результате бороалитирования, боросилицирования, борохромирования, бороазотирования, силицирования или борирования подложки из доэвтектидной углеродистой стали с последующим нанесением ионно-плазменного покрытия TiAlN, TiCN, TiAlCN, TiAlSiN, CrTiN, CrN или TiAlCrYN. Для этого проводили расчет поправочных коэффициентов к результатам жаростойкости термодиффузионных слоев на сталях с учетом химического состава, плотности, кислородной проницаемости, температуры окисления и толщины наносимого на их поверхность ионно-плазменного покрытия по множественной регрессионной модели. Это позволило получить расчетные значения относительного набора массы образцов фиксированным объемом с анализируемыми термодиффузионными слоями и вакуумными покрытиями (табл. 3, 4, рис. 4).

Таблица 3. Характеристики разработанных жаростойких композиций на основе термодиффузионных слоев на сталях и вакуумных ионно-плазменных покрытий

Номер композиции	Тип композиционного покрытия «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие»	Микротвердость диффузионного слоя HV0.1, МПа	Микротвердость покрытия HV0.1, МПа	Минимальная жаростойкость, °С
1	Боридный слой – покрытие TiAlN	14600–15800	28000–32000	600
2	Боридный слой – покрытие TiCN		27000–35000	400
3	Силицидный слой – покрытие TiAlN	2900–3450*	28000–32000	760
4	Силицидный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	650
5	Бороазотированный слой – покрытие TiAlN	9200–11300	28000–32000	580
6	Бороазотированный слой – покрытие TiAlCN		26000–31000	500
7	Борохромированный слой – покрытие CrN	8400–10050	18000–20000	600
8	Борохромированный слой – покрытие TiAlN		28000–32000	620
9	Борохромированный слой – покрытие TiAlCrYN		27000–32000	650
10	Борохромированный слой – покрытие CrTiN		30000–34000	600
11	Бороалитированный слой – покрытие TiAlN	6920–8460	28000–32000	800
12	Бороалитированный слой – покрытие TiCN		27000–35000	400
13	Бороалитированный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	650
14	Боросилицидный слой – покрытие TiAlN	8040–8860	28000–32000	760
15	Боросилицидный слой – покрытие TiAlSiN		32500–38000	600

* Пористая поверхность образца.

Таблица 4. Расчет прогнозной жаростойкости разработанных композиций «диффузионный слой – ионно-плазменное покрытие» на углеродистых доэвтектидных сталях (номера композиций из табл. 3)

Номер композиции	Тип покрытия	Температура начала интенсивного окисления поверхности, °С	Увеличение массы образца с диффузионным слоем	Поправочный коэффициент регрессионной модели	Прогнозный относительный набор массы, г
1	TiAlN	600	0,05	0,86	0,0430
2	TiCN	400	0,05	0,88	0,0440
3	TiAlN	760	0,044	0,86	0,0378
4	TiAlSiN	650	0,044	0,82	0,0361
5	TiAlN	580	0,036	0,86	0,0340
6	TiAlCN	500	0,036	0,85	0,0306
7	CrN	600	0,025	0,91	0,0228
8	TiAlN	620	0,025	0,86	0,0215
9	TiAlCrYN	650	0,025	0,65	0,0163
10	CrTiN	600	0,025	0,78	0,0195
11	TiAlN	800	0,018	0,86	0,0155
12	TiCN	400	0,018	0,88	0,0158
13	TiAlSiN	650	0,018	0,82	0,0148
14	TiAlN	760	0,02	0,86	0,0172
15	TiAlSiN	600	0,02	0,82	0,0164

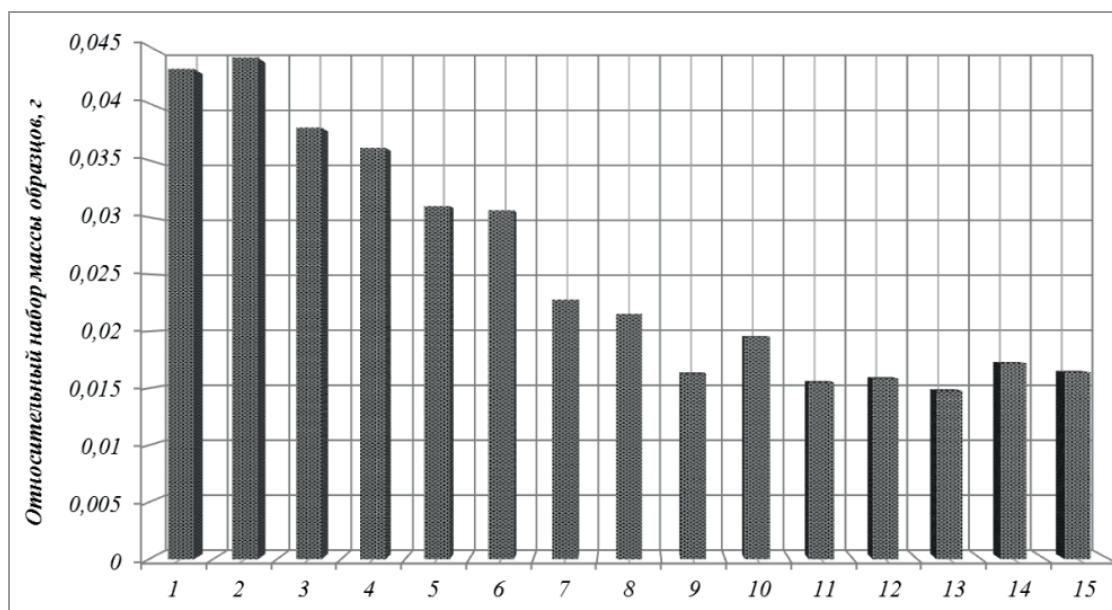


Рис. 4. Результаты прогнозной оценки жаростойкости разработанных композиций по данным жаростойкости диффузионных слоев и окислительности покрытий с уровнем их кислородной проницаемости при толщине 1–3 мкм до температуры 700 °С:

Диффузионные слои: 1, 2 – боридный; 3, 4 – силицидный; 5, 6 – бороазотированный; 7–10 – борохромированный; 11–13 – бороалитированный; 14, 15 – боросилицидный.

Покрытия: 1, 3, 5, 8, 11, 14 – TiAlN; 2, 12 – TiCN; 4, 13, 15 – TiAlSiN; 6 – TiAlCN; 7 – CrN; 9 – TiAlCrYN; 10 – CrTiN

Установлено, что наиболее жаростойкими являются двухслойные композиционные покрытия на углеродистых сталях, полученные в результате предварительного бороалитирования, боросилицирования и борохромирования, в меньшей степени бороазотирования, силицирования или борирования стальной подложки. Оценка влияния ионно-плазменных покрытий на дополнительное повышение жаростойкости сталей с полученными термодиффузионными слоями показала, что наиболее эффективными для повышения жаростойкости поверхности являются следующие составы покрытий: TiAlCrYN, CrTiN, TiAlSiN, TiAlCN, TiAlN, в меньшей степени – TiCN, Cr N.

Показано, что сочетание борохромирования, бороалитирования и боросилицирования с последующим нанесением одинаковых вакуумно-плазменных покрытий толщиной более 1 мкм повышает жаростойкость поверхности не пропорционально жаростойкости термодиффузионных слоев. Повышение жаростойкости поверхности с диффузионным слоем от нанесения вакуумного покрытия тем больше, чем выше жаростойкость диффузионного слоя и такое повышение жаростойкости носит не аддитивный характер.

Установлено, что наибольшая прогнозная жаростойкость поверхности у стальных образцов с термодиффузионным бороалитированным слоем и покрытием бороалитированный слой – покрытие TiAlSiN, которая по относительному набору массы в окислительной атмосфере при температурах до 600 °С в 2,9 раза выше, чем наименее жаростойкой композиции, получаемой на стали в результате борирования и нанесения покрытия TiAlN. Наиболее высокую температуру начала интенсивного окисления поверхности демонстрируют композиции, получаемые в результате силицирования, бороалитирования и боросилицирования, однако пористость силицидных слоев на стали приводит к значительному их окислению и повышению относительного набора массы, а также к существенному снижению микротвердости и качества поверхности с вакуумно-плазменным покрытием.

Выводы

Проанализирована жаростойкость нитридных вакуумных покрытий, а также ряда многокомпонентных термодиффузионных слоев на углеродистых сталях. Обоснована гипотеза о возможности повышения жаростойкости доэвтектидных углеродистых сталей путем предварительного термодиффузионного легирования с последующим нанесением вакуумных нитридных покрытий.

Исследована жаростойкость покрытий композиционного типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Установлено корреляционное влияние различных типов

предварительного термодиффузионного легирования стальной основы на жаростойкость композиционных покрытий.

Разработаны составы ряда новых жаростойких композиций типа «термодиффузионный слой – вакуумное ионно-плазменное покрытие» на основе бороалитированных, боросилицированных, борохромированных, бороазотированных, силицированных и боридных слоев и вакуумных покрытий TiAlN, TiCN, TiAlCN, CrN, CrTiN, TiAlSiN и TiAlCrYN для повышения жаростойкости углеродистых доэвтектидных сталей. Обоснованы составы и допустимые температуры обеспечения минимальной жаростойкости разработанных композиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хоккинг, М.** Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение / М. Хоккинг, В. Вассантари, П. Сидки: Пер. с англ. М.: Мир, 2000. 518 с.
2. **Ткаченко, Г.А.** Повышение коррозионной стойкости стальных деталей комплексной обработкой / Г.А. Ткаченко, А.В. Ковальчук // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 3-го Респ. науч.-техн. семинара. Минск, 5–6 декабря 2013 г. Минск: БГТУ, 2013. С. 119–122.
3. **Константинов, В.М.** Свойства двухслойных износостойких покрытий «термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, В.Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности. 2016. Т. 1. № 2. С. 213–224.
4. **Константинов, В.М.** Разработка аддитивных технологий упрочнения конструкционных сталей на основе химико-термической обработки и нанесения ионно-плазменных покрытий / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, А.В. Ковальчук, С.В. Константинов // Актуальные проблемы прочности. В 2-х т. Т. 2. Витебск: УО «ВГТУ», 2018. С. 377–401.
5. **Комаров, Ф.Ф.** The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F. F. Komarov, V. M. Konstantinov, A. V. Kovalchuk, S. V. Konstantinov, H. A. Tkachenko // Wear. 2016. Vol. 352–353. P. 92–101.
6. **Елагина, О.Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: учеб. пособие / О.Ю. Елагина. М.: Логос, 2009. 488 с.
7. **Ляхович, Л.С.** Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич, Э.Д. Щербаков. Минск: Наука и техника, 1974. 288 с.
8. **Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
9. **Ляхович, Л.С.** Силицирование металлов и сплавов / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Э.Д. Щербаков, Г.Г. Панич. Минск: Наука и техника, 1972. 280 с.
10. **Ворошнин, Л.Г.** Современные износостойкие диффузионные покрытия / Л.Г. Ворошнин // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник науч. тр., посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении». Минск: БНТУ, 2004. С. 10–21.
11. **Берлин, Е.В.** Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
12. **Земсков, Г.В.** Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов / Г.В. Земсков, Р.Л. Коган. М.: Металлургия, 1978. 208 с.
13. **Ворошнин, Л.Г.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Спр. / Под ред. Л.С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
14. **Кайдаш, Н.Г.** Структура и свойства боридосилицидных покрытий на железе и стали / Н.Г. Кайдаш, Л.Н. Четверикова // Вест. Черкас. нац. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2007. № 114. С. 89–115.
15. **Раднаев, Б.В.** Жаростойкость слоев боридов переходных металлов на углеродистой стали 20 / Б.В. Раднаев, А.С. Милонов, Н.Н. Смирнягина // Вест. Бурят. гос. ун-та. 2011. № 3. С. 199–203.
16. **Галынская, Н.А.** Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки / Н.А. Галынская, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Г.В. Стасевич // Вест. Белорус. нац. техн. ун-та. 2010. № 4. С. 30–34.
17. **Макеев, Д.Н.** Влияние вводимых легирующих элементов на свойства стали / Д.Н. Макеев // Вест. СГТУ. 2012. № 3(67). С. 92–98.
18. **Быкова, Т.М.** Влияние химического состава стали на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий: Дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2016. 164 с.
19. **Бирке, Н.** Введение в высокотемпературное окисление металлов / Н. Бирке, Д. Майер. М.: Металлургия, 1987. 189 с.
20. **Kutz, M (Ed.)** Mechanical Engineers' Handbook: Manufacturing and Management / 3rd ed. – ASM International, 2006. Vol. 3. 880 p.
21. **Gleiter, H.** Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure / H. Gleiter // Acta Materialia. 2000. Vol. 48, No. 1. Pp. 1–29.
22. **Douglas, B.E.** Structure and chemistry of crystalline solids. New York: Springer, 2006. 346 p.

REFERENCES

1. **Hokking M. et al.** *Metallicheskie i keramicheskie pokrytiya: poluchenie, svojstva i primenenie* [Metal and ceramic coatings: production, properties and application]. Moscow, Mir Publ., 2000, 518 p.
2. **Tkachenko G. A., Kovalchuk A. V.** *Povyshenie korrozionnoj stojkosti stal'nyh detalej kompleksnoj obrabotkoj* [Improving corrosion resistance of steel parts by integrated treatment]. *Materialy 3-go respublikanskogo nauchno-tekhnicheskogo seminar, Minsk, 5–6 dekabrya = Materials of the third national scientific and technical seminar, Minsk, December 5–6*, BGTU, 2013, pp. 119–122.
3. **Konstantinov V. M. et al.** *Svojstva dvuhslojnyh iznosostojkih pokrytij «termodiffuzionnyj sloj – TiAlN» na stalyah* [Properties of two-layer wear-resistant coatings «thermodiffusion layer – TiAlN» on steels]. *Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti = Journal of Surface Physics and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 213–224.

4. **Konstantinov V. M. et al.** Razrabotka additivnykh tekhnologiy uprochneniya konstruktsionnykh staley na osnove himiko-termicheskoy obrabotki i naneseniya ionno-plazmennyykh pokrytij [Development of additive technologies of strengthening for structural steels based on chemical-thermal treatment and plasma-ion coating]. *Aktual'nye problemy prochnosti: = Current strength problems*, Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2018, vol. 2, pp. 377–401.
5. **Komarov F. F. et al.** *The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings*. Wear, Elsevier Science Publishing Company Publ., Inc, 2016, vol. 352–353, pp. 92–101.
6. **Elagina O. Y.** *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti detalej mashin* [Technological techniques for improving the wear resistance of machine parts]. Moscow, Logos Publ., 2009, 488 p.
7. **Lyahovich L. S.** *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya* [Multi-component diffusion coatings]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974, 288 p.
8. **Krukovich M. G. et al.** *Plastichnost' borirovannykh sloev* [Plasticity of borided layers] Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010, 384 p.
9. **Lyahovich L. S. et al.** *Silicirovanie metallov i splavov* [Silicification of metals and alloys] Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972, 280 p.
10. **Voroshnin L. G.** *Sovremennyye iznosostojkie diffuzionnye pokrytiya* [Modern wear-resistant diffusion coatings]. *Perspektivy razvitiya poverhnostnogo i ob'emnogo uprochneniya splavov: sbornik nauch. tr., posvyashchennyj 40-letiyu kafedry "Materialovedenie v mashinostroenii" = Prospects for surface and volumetric reinforcement of alloys: collection of scientific works dedicated to the 40th anniversary of the Department "Materials Science in Mechanical Engineering"*. Minsk, BNTU Publ., 2004, pp. 10–21.
11. **Berlin E. V. et al.** *Plazmennaya himiko-termicheskaya obrabotka poverhnosti stal'nykh detalej* [Plasma thermo-chemical surface treatment of steel parts]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012, 464 p.
12. **Zemskov G. V. et al.** *Mnogokomponentnoe diffuzionnoe nasyschenie metallov i splavov* [Multi-component diffusion of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 208 p.
13. **Voroshnin L. G.** *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Thermo-chemical treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 424 p.
14. **Kajdash N. G. et al.** *Struktura i svoystva boridosilicidnykh pokrytij na zheleze i stali* [Structure and properties of boridesilicided coatings iron and steel]. *Vestnik Cherkasskogo nacional'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of Cherkassy National University, Physics and Mathematics Series*, 2007, no. 114, pp. 89–115.
15. **Radnaev B. V. et al.** *Zharostojkost' sloev boridov perekhodnykh metallov na uglerodistoy stali 20* [Heat resistance of transition metal boride layers on carbon steel 20]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Buryat State University*, 2011, no. 3, pp. 199–203.
16. **Galynskaya N. A. et al.** *Uprochnyayushchaya obrabotka shtampov dlya glubokoj* [Strengthening of deep extraction stamps]. *Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2010, no. 4, pp. 30–34.
17. **Makeev D. N.** *Vliyanie vvodimyykh legiruyushchih elementov na svoystva stali* [Effect of introduced alloying elements on steel properties]. *Vestnik SGTU = Bulletin of SGTU*, 2012, no. 3(67), pp. 92–98.
18. **Bykova T. M.** *Vliyanie himicheskogo sostava stali na strukturu i svoystva diffuzionnykh boridnykh pokrytij*. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Influence of the chemical composition of steel on the structure and properties of diffuse borided coatings. Ph.D. tech. sci. diss.], Ekaterinburg, 2016, 164 p.
19. **Birke N., Mayer D.** *Vvedenie v vysokotemperaturnoe okislenie metallov* [Introduction of metals to high temperature oxidation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 189 p.
20. **Kutz M.** *Mechanical Engineers Handbook: Manufacturing and Management*, 3rd ed, ASM International, 2006, vol. 3, 880 p.
21. **Gleiter H.** *Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure*, Acta Materiali Publ., 2000, vol. 48, no. 1, pp. 1–29.
22. **Douglas B. E.** *Structure and chemistry of crystalline solids*. New York, Springer Publ., 2006, 346 p.