

ВЛИЯНИЕ БОРИРОВАНИЯ ПОДЛОЖКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ И ГРАФИТИЗАЦИЮ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ «СТАЛЬ – ПОКРЫТИЕ АПУ»

¹В.М. Константинов, ¹А.В. Ковальчук,
²И.П. Акула, ³Д.Г. Пилипцов

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

²Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь

³Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
г. Гомель, Беларусь

Исследовано влияние борирования подложки на твердость и износостойкость систем «диффузионный слой – покрытие АПУ». Исследована морфология поверхности с покрытиями АПУ на подложках с диффузионным боридным слоем, подвергнутых отжигу при различных температурах. Установлено, что наличие на подложке боридного слоя тормозит деградацию покрытий при отжиге.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, борирование, диффузионный слой, вакуумные покрытия, алмазоподобный углерод, микротвердость, износостойкость, Рамановская спектроскопия

INFLUENCE OF BORIDING OF SUBSTRATE ON MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE AND GRAPHITIZATION OF COATINGS IN THE SYSTEM «STEEL – DLC-COATING»

¹V.M. Konstantinov, ¹A.V. Kovalchuk,
²I.P. Akula, ³D.G. Piliptsov

¹Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

²Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

³F. Scorina Gomel State University,
Gomel, Republic of Belarus

The influence of boriding of substrate on the hardness and wear resistance of the systems “diffusion layer – DLC-coating” were investigated. The morphology of the surface with

DLC-coatings on substrates with a diffusion boride layer subjected to annealing at various temperatures was also investigated. It has been established that the presence of a boride layer on the substrate slows down the degradation of the DLC-coatings during annealing.

Keywords: thermochemical treatment, boriding, diffusion layer, vacuum coatings, diamond-like carbon, microhardness, wear resistance, Raman spectroscopy

E-mail: a-v-kov@yandex.com

Введение

Упрочнение поверхности металлических изделий нанесением высокотвердых вакуумных покрытий достигло существенного прогресса. Технологии нанесения покрытий позволяют получать на поверхности изделия очень широкий спектр составов, а толщины покрытий варьируются от десятков нанометров до сотен микрометров [1–5]. Одними из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся являются высокотвердые и износостойкие алмазоподобные углеродные (АПУ) тонкопленочные материалы, для которых в широких пределах можно изменять механические и физические свойства в зависимости от методов и условий синтеза [6, 7].

Однако следует отметить, что толщины получаемых вакуумным осаждением PVD/CVD покрытий наряду с уровнем их эффективной жесткости на реальных деталях зачастую не в состоянии обеспечить высокую несущую способность покрытий [4, 8–11]. Это связано с тем, что свойства твердых покрытий ограничиваются, в том числе, свойствами материалов, на которые они наносятся [4, 8, 9, 12], так как в процессе изнашивания помимо самого покрытия пластическую деформацию воспринимают и накапливают приповерхностные объемы деталей [13–15] — материал подложки.

На основании этого сформировалась новая концепция повышения свойств вакуумных покрытий, заключающаяся в согласовании свойств покрытия и подложки и разработке технологий комплексного поверхностного упрочнения или дуплекс-процессов, включающих модифицирование подложки и последующее нанесение вакуумного покрытия [8, 10, 14, 16–18].

Выполненный анализ существующих работ и опыт работы авторов дают основания полагать, что повышение прочностных характеристик стальной подложки будет способствовать увеличению несущей способности покрытий АПУ. Также выдвинуто предположение о возможности ослабления графитизирующего действия железной подложки на покрытия АПУ за счет формирования на подложке химически инертного слоя — термодиффузионного боридного слоя, который может быть представлен на поверхности фазами Fe_2B при однофазном и FeB при двухфазном борировании.

В данной работе были получены опытные образцы двухслойных покрытий типа «термодиффузионный слой — покрытие АПУ». Они представляли собой структуру модифицированной в результате однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде стальной подложки и высокотвердого покрытия АПУ на поверхности, полученного путем комбинированного физического и химического осаждения. Целью работы было исследование влияния диффузионного боридного на дюрOMETрические и трибологические свойства поверхности в указанных двухслойных покрытиях, а также исследование влияния борирования на процесс графитизации покрытий АПУ при отжиге.

Материалы и методики эксперимента

Борирование осуществляли в порошковой среде «besto-bor» [19]. Насыщение проводили при 950 °С, 6 ч в контейнерах, герметизируемых плавким

затвором. Для проведения процесса использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Исследования микроструктуры поперечного среза борированных образцов проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 3М, для выявления структуры использовали стандартные металлографические реактивы.

Покрытия АПУ осаждали на подложки из армко-железа, предварительно подвергнутого борированию. Для нанесения покрытий использовали комбинированный метод, разработанный в ФТИ НАН Беларуси и сочетающий физическое распыление углеродного катода импульсной дугой постоянного тока и химического осаждения углерода из ацетиленовой плазмы тлеющего разряда при мощности 0,5 МВт и давлении ацетилена 0,1...4,0 Па [6, 20]. Определение микротвердости проводили на автоматическом твердомере DuraScan 20 по методу Кнупа при нагрузках на индентор 0,098, 0,196 и 0,490 Н. Износостойкость образцов оценивали, анализируя поверхность дорожек трения образцов с покрытиями на различных подложках в паре с различными материалами контртела по схеме сухого трения скольжения «диск – шарик», диаметр шарика составлял 10 мм.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) получали на спектрометре Senterra с длиной волны возбуждающего излучения 532 нм, мощностью 10 мВт. Анализ спектров проводился с использованием лицензионной программы Opus (Bruker Optik GmbH). Разложение регистрируемых спектров на D- (1300...1380 см⁻¹) и G-пики (1520...1580 см⁻¹) осуществляли по методу Гаусса. Для оптимизации модели использовали алгоритм Левенберга-Маркардта. Максимальное несовпадение модельных и измеренных кривых составило 5 %.

Изотермический отжиг образцов с покрытиями АПУ на различных подложках — армко-железе, армко-железе с однофазным и двухфазным боридными слоями, проводили при 200, 250, 300, 325 и 350 °С в течение 30 мин в вакуумной печи.

Результаты и их обсуждение

В результате борирования на поверхности армко-железа были получены диффузионные однофазные (Fe₂B) и двухфазные (Fe₂B + FeB) боридные слои (рис. 1). Толщина однофазного боридного слоя составила 180 мкм, микротвердость поверхности — 10,5 ГПа. Общая толщина двухфазного боридного слоя составила 300 мкм, толщина верхнего слоя (FeB) — 120 мкм, микротвердость поверхности — 15,5 ГПа.

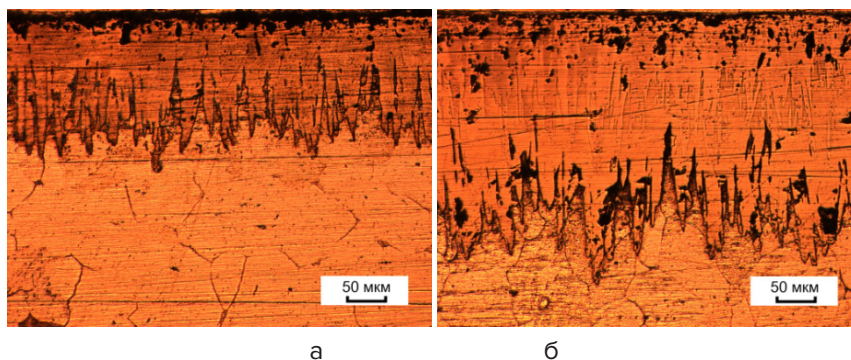


Рис. 1. Микроструктуры диффузионных боридных слоев на армко-железе: а — однофазный (Fe₂B); б — двухфазный (Fe₂B и FeB на поверхности)

На полученные образцы с диффузионными слоями и образцы армко-железа без обработки наносили покрытия АПУ. Толщина полученных покрытий АПУ, определенная методом растровой электронной микроскопии, составила 2,2 мкм.

Методом оптической микроскопии установлено, что морфология АПУ покрытий на различных подложках заметно отличается и более развита на образцах с однофазными и особенно двухфазными боридными слоями, однако количество дефектов поверхности увеличивается на них незначительно. Также следует отметить, что поверхность с двухфазным боридным слоем отличается более сложным рельефом, так как она формируется иглами призматической формы высокобористой фазы FeB, которые сложно шлифуются и сползаются по причине их высокой твердости на уровне 16...18 ГПа. Поэтому покрытия АПУ на подложках с двухфазным боридным слоем имели большую площадь и большое количество криволинейных участков.

При измерении микротвердости поверхности с покрытиями АПУ даже на самых малых нагрузках (0,1 Н) глубина внедрения индентора составляла не менее 14...16 % толщины покрытия. В этой связи важно отметить, что при аналогичных и больших нагрузках индентора определяемая таким образом микротвердость поверхности является интегральной характеристикой, отражающей способность слоистой системы «боридный слой — покрытие АПУ» противостоять пластической деформации и в совокупности учитывает вклады диффузионного боридного слоя (подложки) и покрытия АПУ.

Из результатов дюрометрических испытаний установлено, что борирование приводит к многократному возрастанию твердости системы пленка-подложка. При этом эффект более заметно выражен для подложек с двухфазным боридным слоем (табл. 1).

Табл. 1

Микротвердость алмазоподобных покрытий по Кнупу на подложках из борированного армко-железа (толщина покрытия АПУ 2,2 мкм)

Подложка	Микротвердость H_k , ГПа / Глубина проникновения индентора h , мкм при нагрузке на индентор, H					
	0,098		0,196		0,490	
	H_k	h	H_k	h	H_k	h
Без борирования	3,7	0,61 (28 %)	2,2	1,12 (51 %)	1,9	1,94 (88 %)
Однофазное борирование	10,8	0,36 (16 %)	10,6	0,51 (23 %)	12,0	0,77 (35 %)
Двухфазное борирование	14,7	0,31 (14 %)	11,8	0,49 (22 %)	13,0	0,73 (33 %)

Установлено, что при разнице в микротвердости между однофазным и двухфазным боридными слоями на армко-железе около 5 ГПа, разница в наблюдаемых значениях микротвердости двухслойных систем при нагрузках 0,098...0,49 Н составляет 1,0...3,9 ГПа. То есть вклад покрытия АПУ в интегральную микротвердость поверхности на однофазных боридных слоях больше по сравнению с двухфазными. Это можно объяснить большей деформацией разрушения и запасом пластичности однофазных боридных слоев [21, 22], позволяющей им приносить вклад в упругое восстановление покрытия АПУ при больших нагрузках.

Вместе с тем более высокая микротвердость жесткость двухфазных боридных слоев позволяет покрытиям АПУ на них меньше продавливаться при микроиндентировании — глубина проникновения индентора в процентном отношении для них несколько меньше, чем для покрытий на однофазных боридных слоях и значительно меньше для покрытий АПУ на армко-железе, не подвергнутом упрочняющей обработке.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными о влиянии аналогичных стальных подложек с диффузионным слоем на поведение PVD покрытий на базе систем Ti-N и Ti-Al-N [4, 10, 13]. Вместе с этим прослеживается некоторое снижение эффективности рассматриваемых двухслойных композиций с боридными слоями и покрытиями АПУ при нагрузках выше 0,49 Н по сравнению с покрытиями АПУ на неупрочненных подложках, где наблюдается равномерное снижение микротвердости поверхности с покрытием при увеличении нагрузки на индентор. Обнаруженное явление может быть связано с особенностью самих диффузионных боридных слоев, заключающейся в их высокой чувствительности к концентраторам напряжений (в данном случае определенной формы индентора Кнупа) по причине сложного напряженного состояния в диффузионном слое и повышенной хрупкости самих боридов железа, с большим градиентом твердости на границе покрытие-подложка по сравнению с покрытиями на базе Ti-N, а также малой толщиной покрытий АПУ.

Аналогичные зависимости получены и в результате предварительных трибологических испытаний покрытий АПУ на различных подложках (табл. 2). Установлено, что наличие под тонким покрытием АПУ твердого боридного подслоя способствует повышению износостойкости поверхности при сопоставимом среднем коэффициенте трения, который даже несколько ниже для образцов с покрытиями АПУ на однофазном боридном слое. Полученные результаты требуют более детального исследования с определением механизма изнашивания рассматриваемых слоистых систем.

Табл. 2

Результаты триботехнических испытаний АПУ покрытий на подложках из армо-железа после различных видов обработки

Вид обработки подложки	Условия эксперимента		Материал контртела	Средний коэф. тр.	Примечание
	нормальная нагрузка, Н	время, мин			
Без обработки	1	30	ШХ15	0,38	След виден очень слабо
Без обработки	2	60	ШХ15	0,35	След виден отчетливо
Без обработки	1	30	ВК6	0,28	След виден отчетливо
Однофазное борирование	1	30	ШХ15	0,29	След виден очень слабо
Однофазное борирование	2	60	ШХ15	0,31	След виден очень слабо
Однофазное борирование	1	30	ВК6	0,24	След виден отчетливо
Двухфазное борирование	1	30	ШХ15	0,34	След виден очень слабо
Двухфазное борирование	2	60	ШХ15	0,30	След виден очень слабо
Двухфазное борирование	1	30	ВК6	0,36	След виден отчетливо

Повышение износостойкости двухслойных систем можно объяснить тем, что предварительное упрочнение в результате борирования увеличивает время до появления остаточной деформации в подложке и снижает градиент жесткости и твердости между подложкой и покрытием. Образующиеся в результате борирования остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое подложки в какой-то степени компенсируют растягивающие напряжения АПУ покрытия и увеличивают время до появления усталостных трещин. Как известно, в результате борирования возникают остаточные напряжения сжатия величиной около 800...1000 МПа [23]. В то же время, в момент начала последовательного разрушения покрытия более жесткий термодиффузионный слой накапливает меньше остаточной деформации и тормозит развитие очага разрушения, а при полном разрушении покрытия под контртелом работает дольше неупрочненной подложки. Исходя из этого, полученные результаты представляют практический интерес для повышения стойкости деталей трения с покрытиями АПУ, не испытывающих значительных динамических нагрузок.

Однако, известно, что использование покрытий АПУ на сталях и сплавах железа ограничено из-за каталитического действия железа на процесс графитизации покрытий АПУ при нагреве. В связи с этим для применения борированных стальных подложек необходимо оценить их влияние на процесс графитизации покрытий в сравнении с исходными подложками из железа, а также определить температуру начала графитизации покрытий АПУ на подложках с диффузионным боридным слоем.

Проведенный методом спектроскопии КРС и оптической микроскопии анализ поверхности с АПУ покрытиями на различных подложках, подвергнутых отжигу при различных температурах (рис. 2–4) показал, что покрытия АПУ на подложках без боридного слоя полностью меняют структуру после отжига 300...325 °С, что должно быть связано с их графитизацией, а после отжига 350 °С наблюдаются только отдельные следы присутствия покрытия, самого же покрытия не наблюдается.

Это подтверждается результатами анализа спектров КРС покрытий АПУ на различных подложках (рис. 5, 6), из которых установлено, что в результате отжига покрытий происходит их постепенная графитизация, увеличивающаяся с ростом

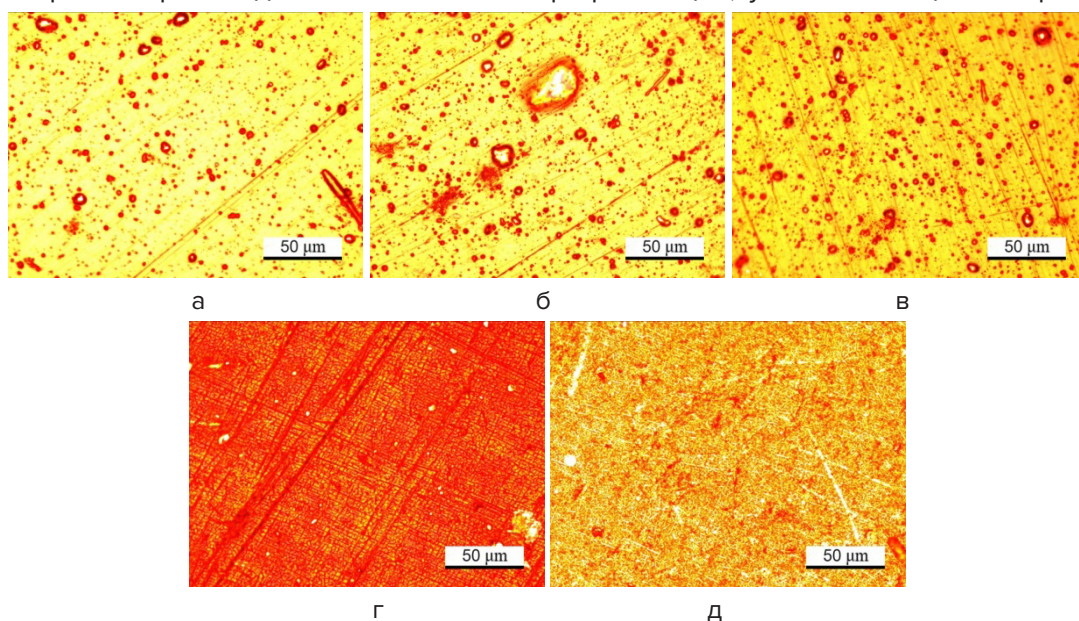


Рис. 2. Оптические фотографии поверхности образцов армко-железа с покрытиями АПУ, подвергнутых отжигу при различных температурах в течение 30 мин:
а — 200 °С; б — 250 °С; в — 300 °С; г — 325 °С; д — 350 °С

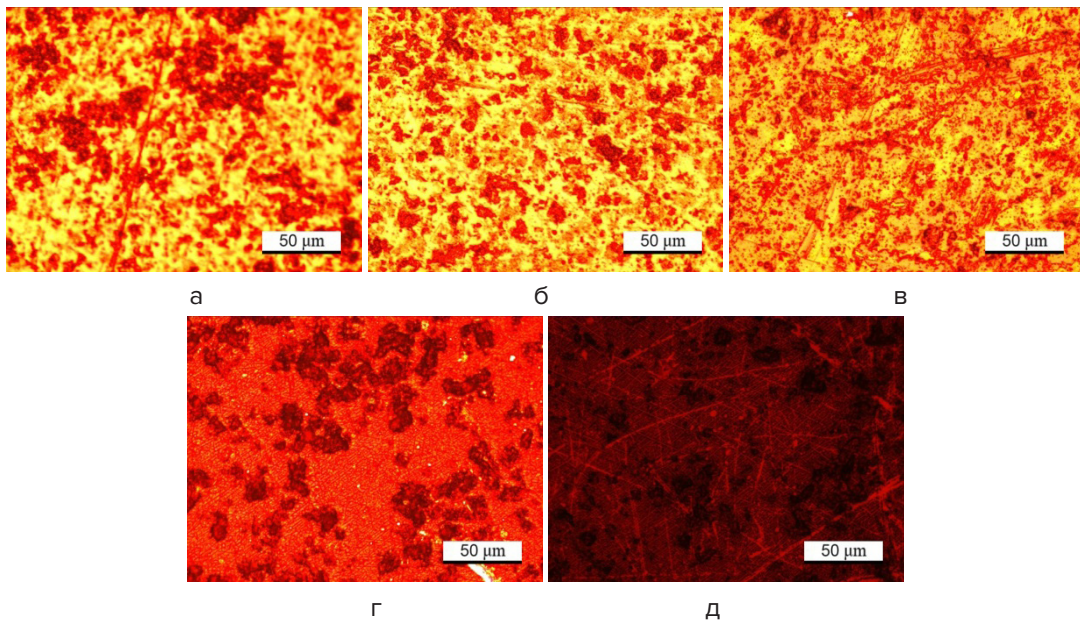


Рис. 3. Оптические фотографии поверхности образцов армко-железа с однофазным боридным слоем и покрытиями АПУ, подвергнутых отжигу при различных температурах в течение 30 мин:
а — 200 °С; б — 250 °С; в — 300 °С; г — 325 °С; д — 350 °С

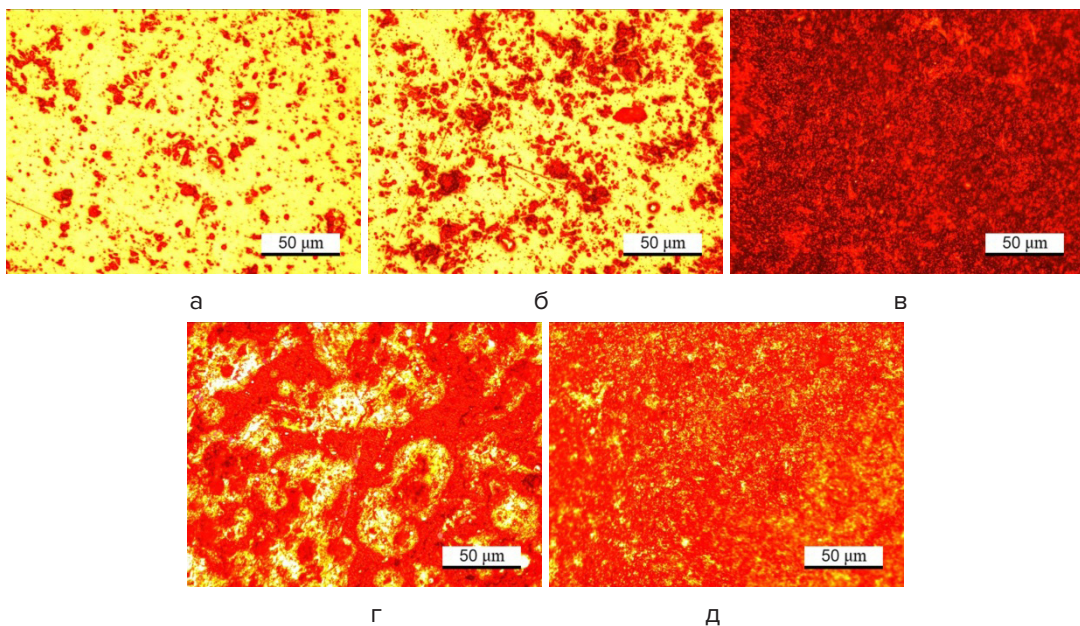


Рис. 4. Оптические фотографии поверхности образцов армко-железа с двухфазным боридным слоем и покрытиями АПУ, подвергнутых отжигу при различных температурах в течение 30 мин:
а — 200 °С; б — 250 °С; в — 300 °С; г — 325 °С; д — 350 °С

температура отжига, и достигающая максимума при температурах отжига 300...325 °С. Это обусловлено каталитическим действием железа подложки на углерод в sp^3 состоянии и последний трансформируется в состояние sp^2 . При увеличении температуры происходит усиление диффузии углерода из покрытия в поверхностный слой подложки и его взаимодействие с атомами железа, что приводит к усилению процесса термоокислительной деструкции sp^3 компоненты АПУ покрытия.

Наличие под покрытием АПУ диффузионного боридного слоя снижает отношение интенсивностей D - и G -пиков I_D/I_G на спектрах КРС, и этот эффект сильнее для двухфазных боридных слоев (Fe_2B+FeB). Вместе с этим, указанное отношение растет с увеличением температуры отжига для всех покрытий, но для покрытий АПУ на подложках армо-железа с боридным слоем отношение I_D/I_G остается ниже, чем для покрытий на армо-железе без диффузионного слоя и с увеличением температуры отжиг эта разница существеннее.

Следует также отметить, что ширина G -пика на спектрах КРС от покрытий АПУ на подложках с боридным слоем меньше, а ширина D -пика больше, по сравнению с их значениями для спектров КРС покрытий на подложках без диффузионного слоя.

Увеличение соотношения I_D/I_G с ростом температуры отжига (табл. 3–5) может быть обусловлено уменьшением размеров sp^2 -кластеров, а сужение ширины G -пика может быть вызвано увеличением их упорядоченности [24]. Некоторое уширение D -пика может свидетельствовать о разупорядочивании и уменьшении числа sp^3 -кластеров. Следует также отметить, что в полученных спектрах линия G смещена на 20...50 cm^{-1} относительно той же линии у монокристалла графита, что может являться подтверждением определенной степени аморфности графитовой фазы в полученных покрытиях [25].

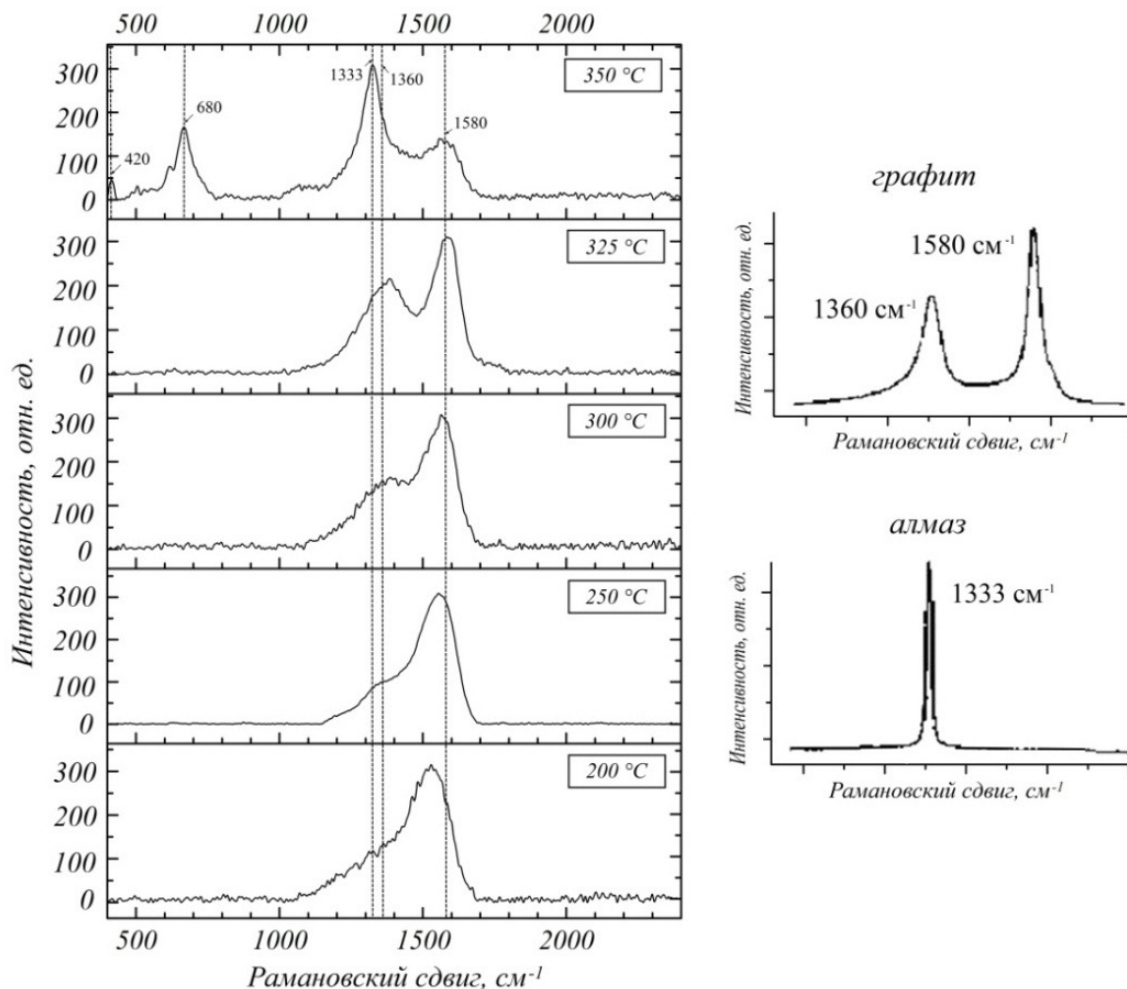


Рис. 5. Спектры КРС покрытий АПУ на подложках из армо-железа, подвергнутых отжигу при различных температурах, справа — спектры графита и алмаза

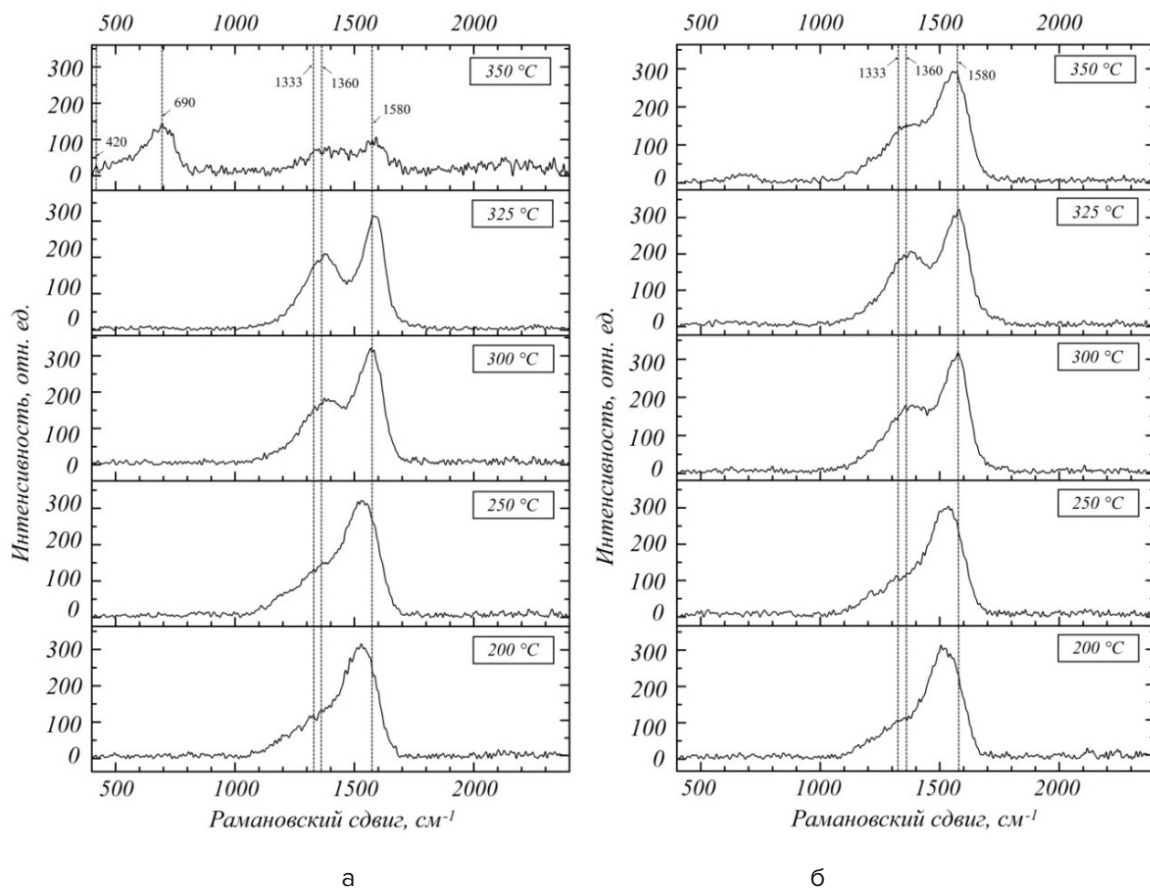


Рис. 6. Спектры КРС покрытий АПУ на подложках из армко-железа с однофазным (а) и двухфазным (б) боридным слоем, подвергнутых отжигу при различных температурах

Табл. 3

Результаты КР-спектроскопии покрытий АПУ на подложке из армко-железа, подвергнутых отжигу при различных температурах

Температура отжига, °С	D-пик		G-пик		Отношение I_D/I_G
	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	
200	1376,5	325,3	1533,6	142,4	0,49
250	1411,6	248,7	1559,3	125,6	0,42
300	1403,4	309,1	1570,4	109,6	0,69
325	1377,4	239,4	1586,4	106,8	0,67
350	1323,8	123,7	1543,6	178,6	2,04

Табл. 4

Результаты КР-спектроскопии покрытий АПУ на подложке из армко-железа с однофазным боридным слоем, подвергнутых отжигу при различных температурах

Температура отжига, °С	D-пик		G-пик		Отношение I_D/I_G
	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	
200	1366,1	324,7	1527,8	155,0	0,44
250	1386,1	333,0	1540,1	141,4	0,57
300	1405,2	306,8	1574,9	105,0	0,72
325	1377,1	233,7	1585,2	105,8	0,66
350	1339,6	282,2	1580,2	56,7	1,41

Табл. 5

Результаты КР-спектроскопии покрытий АПУ на подложке из армко-железа с двухфазным боридным слоем, подвергнутых отжигу при различных температурах

Температура отжига, °С	D-пик		G-пик		Отношение I_D/I_G
	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	положение, см ⁻¹	ширина, см ⁻¹	
200	1373,4	319,9	1528,8	147,1	0,42
250	1387,6	349,8	1534,6	142,3	0,49
300	1410,8	333,9	1575,3	101,9	0,79
325	1399,1	311,3	1579,0	107,1	0,81
350	1407,4	336,3	1565,2	122,4	0,75

В совокупности полученные результаты анализа спектров КРС и состояния поверхности образцов с покрытиями позволяют утверждать, что присутствие на железных подложках однофазного боридного слоя (фаза Fe₂B на поверхности) слабо влияет на деструкцию структуры АПУ покрытий при повышении температуры отжига, а эффект наблюдается по результатам отжига 350 °С, после которого покрытие АПУ еще обнаруживается на поверхности, но уже фрагментировано. Наличие на железной подложке двухфазного боридного слоя (фаза FeB на поверхности) заметно снижает процессы разрушения АПУ покрытий и эволюцию поверхностных дефектов (микроуровень) с повышением температуры отжига. В результате отжига АПУ покрытий на таких подложках также происходит изменение морфологии и структуры покрытия,

однако оно сохраняется и идентифицируется по пикам на спектрах КРС. Из этого следует, что двухфазное борирование несколько тормозит графитизацию покрытий при температурах отжига до 300 °С, хотя и не позволяет ее полностью исключить.

Заключение

1. Экспериментально доказан и теоретически обоснован факт повышения интегральной микротвердости и износостойкости поверхности с покрытием АПУ за счет предварительного борирования стальной подложки. Максимальное повышение микротвердости ($\Delta H = 11$ ГПа при нагрузках 0,098...0,490 Н) характерно для двухфазного борирования, что обусловлено высокой микротвердостью и жесткостью двухфазных боридных слоев, которые позволяют покрытиям АПУ на них меньше продавливаться при микроиндентировании. Наличие боридного слоя также способствует повышению износостойкости поверхности с покрытием АПУ. Это можно объяснить тем, что предварительное борирование увеличивает время до появления остаточной деформации в подложке и снижает градиент жесткости и твердости между подложкой и покрытием. Образующиеся в результате борирования остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое подложки на уровне 800..1000 ГПа в какой-то степени компенсируют растягивающие напряжения АПУ покрытия и увеличивают время до появления усталостных трещин.

2. Впервые изучено влияние предварительного борирования стальной подложки на деструкцию структуры АПУ покрытий при нагреве. Установлено, что наличие на железной подложке двухфазного боридного слоя (фаза FeB на поверхности) заметно снижает процессы разрушения покрытий до 300...325 °С, заключающиеся в их графитизации, окислении и отслаивании, а также эволюцию поверхностных дефектов с повышением температуры отжига, хотя и не позволяет полностью исключить указанные процессы. Обнаруженный эффект обусловлен существенным снижением каталитического действия железа за счет образования на подложке термодинамически устойчивых боридов железа. Наличие тугоплавкой высокобористой фазы FeB препятствует контакту АПУ покрытия с железом подложки и тем самым способствует повышению теплостойкости поверхности в системе «боридный слой — покрытие АПУ».

3. Полученные результаты могут стать основанием для эффективного использования покрытий АПУ за счет предварительного борирования стальной подложки без потери в свойствах упрочняемой поверхности, а также могут быть использованы при разработке новых способов комплексного поверхностного упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nanostructured Coatings / Eds. A. Gavaleiro, J.T. De Hosson. // Berlin: Springer-Verlag, 2006, 648 p.
2. Metallic and Ceramic Coatings / Eds. M.G. Hocking, V. Vasantasree, P. Sidky — Harlow: Longman scientific and technical, 1989. — 670 p.
3. Воронин, Н. А. Актуальные проблемы создания топокомпозитов триботехнического назначения / Н. А. Воронин. — Механика и машиностроение, 2011. — С. 695–698.
4. Komarov F. F., Konstantinov V. M., Kovalchuk A. V., Konstantinov S. V., Tkachenko H. A. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings // Wear, 2016, vol. 352–353, pp. 92–101.
5. Берлин, Е.В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных

- деталей / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. — М.: Техносфера, 2012. — 464 с.
6. Чекан, Н.М. Светопоглощающие покрытия на основе алмазоподобного углерода / Н. М. Чекан, И. П. Акула, Н. В. Логуновская. — Контенант, 2013, Т. 12, № 4. — С. 6–15.
7. Чекан, Н.М. Упрочняющие покрытия алмазоподобного углерода / Н.М. Чекан, И.П. Акула. —Сборник материалов 12-го международного симпозиума «Белорусский промышленный форум» (Минск, 19–22 мая). — Минск 2009. — С. 111–112.
8. Tong Y., Guo T. W., Wang J., Liang H. F., Qian M. Effects of plasma nitriding and TiN coating duplex treatment on wear resistance of commercially pure titanium // *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 217–218, pp. 1050–1055.
9. Воронин, Н.А. Топокомпози́ты — новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения / Н. А. Воронин. — Трение и износ, 1999, часть 1, Т. 20, № 3. — С. 533–544.
10. Huang X., Etsion I., Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN TiAlN coating systems // *Wear*, 2015, vol. 338–339, pp. 54–61.
11. 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.
12. Игнатенко, П.И. О влиянии подложки на формирование состава, структуры и твердости нитридных и боридных пленок, полученных методами ионного осаждения / П.И. Игнатенко, Д. Н. Терпий, Н. А. Кляхина. — Журнал технической физики, 2009, Т. 79, № 7. — С. 101–107.
13. Получение и свойства покрытий TiAlN на стали / Ф. Ф. Комаров [и др.]; Ползуновский альманах, 2014, № 2. — С. 10–15.
14. Du H., Zhao H., Xiong J., Xian G. Effect of interlayers on the structure and properties of TiAlN based coatings on WC-Co cemented carbide substrate // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, 2013, vol. 37, pp. 60–66.
15. Комплексное поверхностное упрочнение стальных изделий // Ф. Ф. Комаров [и др.]; Литье и металлургия. — 2014, №4 (77). — С. 144–150.
16. Podgornik B., Vizintin J., Wanstrand O., Larsson M., Hogmark S., Ronkainen H., Holmberg K. Tribological Properties of Plasma Nitrided and Hard Coated AISI 4140 Steel // *Wear*, 2001, vol. 249, pp. 254–259.
17. Shengli M. The composite of nitrided steel and TiN coatings by plasma duplex treatment and the effect of pre-nitriding // *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 137, pp. 116–121.
18. Ковальчук, А. В. Методический подход к созданию топокомпози́та триботехнического назначения «сталь – PVD покрытие» / А. В. Ковальчук, Г. А. Ткаченко. — Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник науч. тр.: в 3 кн. — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014, Кн. 1. — С. 164–174.
19. BESTO (Белорусские среды для термодиффузионной обработки) [Electronic resource] — Mode of access: <http://besto.by/vidy-obrabortok/borirovanie>. — Date of access: 15.04.2017.
20. Чекан, Н. М. Повышение ресурса твердосплавного режущего инструмента / Н. М. Чекан, И. П. Акула, В. В. Акулич. — Пленки и покрытия-2009: Труды 9-ой междунар. конф. (Санкт-Петербург, 26–29 мая), под ред. В.Г. Кузнецова. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — С. 60–62.
21. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 384 с.
22. Константинов, В. М. борирования на размерную точность и хрупкость поверхности прецизионных деталей из нетеплостойких инструментальных сталей / В. М. Константинов,

В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук. — Актуальные проблемы в машиностроении. — 2017, Т. 4, № 4. — С. 9–15.

23. Konstantinov V. M., Dashkevich V. G., Kovalchuk A. V. Surface engineering of slider valves of fluid power motors made of tool steels by using boriding saturation mixture // *Agricultural Engineering*, 2015, vol. 47, pp. 1–6.

24. Руденков, А. С. Влияние концентрации металла на фазовый состав, структуру и свойства углерод-металлических покрытий / А. С. Руденков. — Проблемы физики, математики и техники. — 2015, №3 (24). — С. 26–32.

25. Влияние ионного азотирования на фазовый состав, структуру и свойства углеродных покрытий / А. С. Руденков [и др.]; **Проблемы физики, математики и техники**. — 2016, № 1(26). — С. 37–41.

REFERENCES

1. *Nanostructured Coatings* / Eds. A. Gavaleiro, J.T. De Hosson. // Berlin: Springer-Verlag, 2006, 648 p.

2. *Metallic and Ceramic Coatings* / Eds. M.G. Hocking, V. Vasantasree, P. Sidky — Harlow: Longman scientific and technical, 1989, 670 p.

3. Voronin N. A. Aktualnyie problemyi sozdaniya topokompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya [Actual problems of creating tribochemical design topocomposites] // *Mekhanika i mashinostroenie*, 2011, pp. 695–698. (in Russian)

4. Komarov F. F., Konstantinov V. M., Kovalchuk A. V., Konstantinov S. V., Tkachenko H. A. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings // *Wear*, 2016, vol. 352–353, pp. 92–101.

5. Berlin E. V., Koval N. N., Seydman L. A. Plazmennaya himiko-termicheskaya obrabotka poverhnosti stalnyih detaley [Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts]. Moscow, Tehnosfera, 2012, 464 p. (in Russian)

6. Chekan N. M., Akula I. P., Logunovskaya N. V. Svetopogloschayushchie pokryitiya na osnovealmazopodobnogo ugleroda [Light absorbing coatings based on diamond-like carbon] // *Kontenant*, 2013, vol. 12, iss. 4, pp. 6–15. (in Russian)

7. Chekan N. M., Akula I. P. Uprochnyayushchie pokryitiyaalmazopodobnogo ugleroda [Hardening coatings of diamond-like carbon] // *Sbornik materialov 12-go mezhdunarodnogo simpoziuma «Belorusskiy promyshlennyiy forum» (Minsk, 19–22 maya)*, Minsk, 2009, pp. 111–112. (in Russian)

8. Tong Y., Guo T. W., Wang J., Liang H. F., Qian M. Effects of plasma nitriding and TiN coating duplex treatment on wear resistance of commercially pure titanium // *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 217–218, pp. 1050–1055.

9. Voronin N. A. Topokompozityi — novyy klass konstruksionnyih materialov tribotekhnicheskogo naznacheniya. Ch.1 [Topocomposites are a new class of tribological engineering materials. P.1] // *Trenie i iznos*, 1999, vol. 20, iss. 3, pp. 533–544. (in Russian)

10. Huang X., Etsion I., Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN TiAlN coating systems // *Wear*, 2015, vol. 338–339, pp. 54–61.

11. Konstantinov V. M., Kovalchuk A. V., Dashkevich V. G. Svoystva dvuhsloynnyih iznosostoykih pokryitii «termodiffuzionnyiy sloy – TiAlN» na stalyah [Properties of two-layer wear-resistant coatings «thermodiffusion layer – TiAlN»] // *Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti*, 2016, vol. 1, iss. 2, pp. 213–224. (in Russian)

12. Ignatenko P. I., Terpiy D. N., Klyahina N. A. O vliyaniipodlozhki na formirovanie sostava, strukturyi i tverdosti nitridnyih i boridnyih plenok, poluchennyih metodami ionnogo osazhdeniya [On the influence of the substrate on the composition, structure, and hardness of nitride and boride films ob-

- tained by ion deposition] // Zhurnal tehnikeskoy fiziki, 2009, vol. 79, iss. 7, pp. 101–107. (in Russian)
13. Komarov F. F., Kovalchuk A. V., Konstantinov S. V., Pilko V. V. Poluchenie i svoystva pokryitiy TiAlN na stali [Preparation and properties of TiAlN coatings on steel] // Polzunovskiy almanah, 2014, iss. 2, pp. 10–15. (in Russian)
 14. Du H., Zhao H., Xiong J., Xian G. Effect of interlayers on the structure and properties of TiAlN based coatings on WC-Co cemented carbide substrate // Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2013, vol. 37, pp. 60–66.
 15. Komarov F. F., Tkachenko G. A., Kovalchuk A. V., Konstantinov S. V. Kompleksnoe poverhnostnoe uprochnenie stalnykh izdeliy [Complex surface hardening of steel products] // Lite i metallurgiya, 2014, iss. 4 (77), pp. 144–150. (in Russian)
 16. Podgornik B., Vizintin J., Wanstrand O., Larsson M., Hogmark S., Ronkainen H., Holmberg K. Tribological Properties of Plasma Nitrided and Hard Coated AISI 4140 Steel // Wear, 2001, vol. 249, pp. 254–259.
 17. Shengli M. The composite of nitrided steel and TiN coatings by plasma duplex treatment and the effect of pre-nitriding // Surface and Coatings Technology, 2001, vol. 137, pp. 116–121.
 18. Kovalchuk A. V., Tkachenko G. A. Metodicheskiy podhod k sozdaniyu topokompozita tribotekhnicheskogo naznacheniya «stal – PVD pokryitie» [Methodical approach to the creation of tribo-technical assignment «steel – PVD coating»] / Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing]. collection of scientific papers, Minsk, FTI NAN Belarusi, 2014, vol. 1, pp. 164–174. (in Russian)
 19. BESTO (Belarusian environments for thermodiffusion treatment) [Electronic resource] – Mode of access: <http://besto.by/vidy-obrabotok/borirovanie/>. / Date of access: 15.04.2017.
 20. Chekan N. M., Akula I. P., Akulich V. V. Povyishenie resursa tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta [Increase in the resource of carbide cutting tools] // Plenki i pokryitiya-2009: Trudy 9-oy mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 26–29 maya), [pod red. V.G. Kuznetsova]. St. Petersburg, Izd-vo Politehn. un-ta, 2009, pp. 60–62. (in Russian)
 21. Krukovich M. G., Prusakov B. A., Sizov I. G. Plastichnost borirovannykh sloev [The plasticity of the boriding layers]. – Moscow, FIZMATLIT, 2010, 384 p. (in Russian)
 22. Konstantinov V. M., Dashkevich V. G., Kovalchuk A. V. Vliyanie borirovaniya na razmernuyu tochnost i hrupkost poverhnosti pretsizionnykh detaley iz neteplostoykikh instrumentalnykh staley [Effect of boronization on the dimensional accuracy and brittleness of the surface of precision parts from non-heat-resistant tool steels] // Aktualnyye problemy v mashinostroenii. 2017, vol. 4, iss. 4, pp. 9–15. (in Russian)
 23. Konstantinov V. M., Dashkevich V. G., Kovalchuk A. V. Surface engineering of slider valves of fluid power motors made of tool steels by using boriding saturation mixture // Agricultural Engineering, 2015, vol. 47, pp. 1–6.
 24. Rudenkov A. S. Vliyanie kontsentratsii metalla na fazovyy sostav, strukturu i svoystva uglerod-metallicheskiy pokrytiy [Influence of metal concentration on the phase composition, structure and properties of carbon-metal coatings] // Problemy fiziki, matematiki i tekhniki, 2015, iss. 3 (24), pp. 26–32. (in Russian)
 25. Rudenkov A. S., Rogachev A. V., Piliptsov D. G., Fedosenko N. N., Syan Hun D. Vliyanie ionnogo azotirovaniya na fazovyy sostav, strukturu i svoystva uglerodnykh pokrytiy [Influence of ionic nitriding on the phase composition, structure and properties of carbon coatings] // Problemy fiziki, matematiki i tekhniki, 2016, iss. 1(26), pp. 37–41. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 25.04.17