

¹Р.Ж. Абуова*, ²Э.Б. Тен

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Мәскеу болат және қорытпалар институты, Мәскеу, Ресей

*e-mail: ryskena@mail.ru

МАШИНА ЖАСАУДА ҚОЛДАНЫЛАТЫН ХРОМ-НИКЕЛЬ-ВАНАДИЙ БОЛАТТАРЫНДАҒЫ TiN-Cu КЕРАМИКАЛЫҚ-МЕТАЛЛ ЖАБЫНДАРДЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Андатпа. Бұл мақалада машина жасауда қолданылатын хром-никель-ванадий болаттарындағы керамикалды металл нанокұрылымдық TiN-Cu жабындының наноинденденциясын, скретч-тестілеуін зерттеу қарастырылған. Наноинденденция әдісімен, атап айтқанда, TiN-Cu жабын бетінің атомдық күш микроскопының наносенсорының шегінуіне механикалық реакциясын талдау дислокацияның пайда болуы, ығысу тұрақсыздығының пайда болуы, фазалық ауысулар және т. б. сияқты құбылыстарды тікелей бақылау үшін қолданылады. Скретч-тестілеу әдісімен әр түрлі мыс (7%, 14%) құрамы бар балқытылған ЭО5 жаңа үлгідегі төсемдерге жағылған TiN-Cu жабынын бұзу механизмдері зерттелді. Жабындардың бұзылуы субстрат материалының пластикалық қысылуына байланысты сызаттар бойында пайда болатын үйінділердің шырдарында жарықтар пайда болуынан басталатыны көрсетілген. Инденторға жүктеменің әр артуымен жойылу сипаты өзгереді.

Негізгі сөздер: тісті доңғалақтар, втулкалар, доға разряды, катод, индентор, үйкеліс.

Кіріспе. Соңғы уақытта материалтануда нанокұрылымды қаптамалардан тәуелді физика-механикалық қасиеттерін зерттеу маңызды болып табылады. Зерттеушілер металды материалдардың (қаттылық, төзімділік және т.б.) әртүрлі қасиеттерін жақсарту үшін нанокұрылымды жабындыларды қолданады, бірақ іс жүзінде бәсеңдетуші қасиеттердің өзгерісін оқымайды. Өзінің төзімділігімен, коррозияға төзімділігімен, ыстыққа төзімділігімен ерекшелінетін жабындыларды қолдану кезінде оларды өтеу ресурстардың шығынын және металдардың шығынын қысқартуға мүмкіндік береді, осыдан механизмдердің, қондырғылардың, машиналардың төзімлігін, сенімділігін және сапасын жақсарту мүмкіндігі бар. Ал бұл өз кезегінде ресурстарды үнемдеуінің, еңбек өнімділігінің өсуін береді.

Машина және механизмдер бөлшектері үшін төзімділік қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететін 20ХН, 20ХН4ФА, 25Х2НМФА болаттары қолданылады. Таңдалған болаттарға хром, никель және ванадий легирлеуші элементтерді қосу арқылы жаңадан ЭО3, ЭО4, ЭО5 болаттарын алдық. Механизмдер мен тораптардың бетінде орналасқан нанокұрылымдық қорғаныс жабындары жабдықтың қызмет ету мерзімін арттырады.

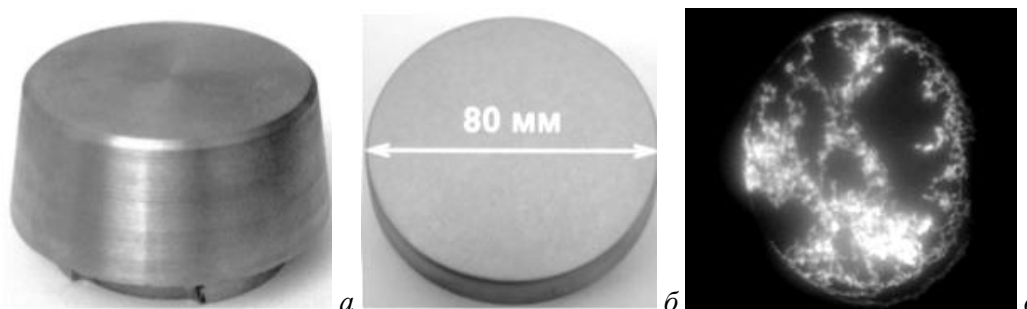
1-кесте. Болаттардың жалпы сипаттамасы және мақсаты [1]

Болат	Тағайындалуы
20ХН	тісті доңғалақтар, төлкелер, саусақтар, бекіткіштер және жоғары тұтқырлық пен қалыпты шынықтырушылық қажет ететін басқа бөлшектер.
20ХН4ФА	жоғары температурада (300-400 °С) коррозиялық ортада жұмыс жасайтын жіберу клапаны, болттар, бұрандалар және басқа маңызды бөлшектер.
25Х2НМФА	

Зерттеу объектісі. Зерттеу нысаны ретінде 20ХН, 20ХН4ФА, 25Х2НМФА стандартты болаттар және балқытылған ЭО3, ЭО4, ЭО5 болаттар таңдалды.

Катод материалы ретінде коммерциялық таза титан (ВТ1-0 қорытпасы: 99,5 %Ti), мыс (МЗ қорытпасы: 99,5% Cu) және ұнтақ металлургиясында өндірілген Ti - Cu жүйесінің композициялық материалдары таңдалды. Композиттердегі қосымша элементтің (мыс) концентрациясы салыстырмалы түрде төмен болды және келесідей таңдалды: 7%; 14%.

1-суретте 20 сағ жұмыс істегеннен кейін (б), доғалық разрядқа ұшырамаған (а) катодтың пайда болуы, сондай-ақ катодты дақтар жолдарының жарқырауы (в) көрсетілген.



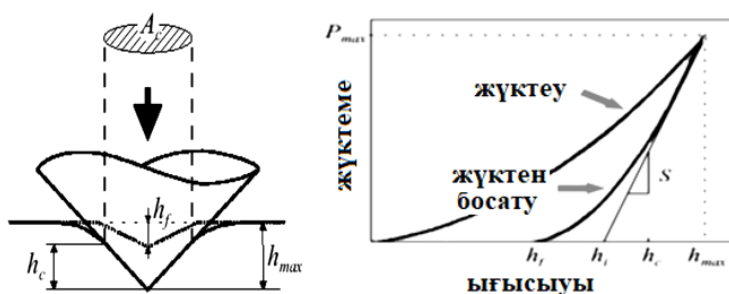
1-сурет. Катодтың сыртқы түрі , доғалық разрядқа ұшырамаған (а), 20 сағ жұмыс істегеннен кейін (б), сондай-ақ катодты дақтар жолдарының жарқырауы (в)

Зерттеу әдістемесі. Болаттың жұмыс беттеріндегі көпфункционалды жабындарды қалыптастыру бойынша негізгі ережелерді іске асыру үшін «Булат» ННВ-6.6-ИЗ вакуумында ("МИСиС" Ұлттық зерттеу технологиялық университетінде, Мәскеу) ионды-плазмалық тозандатудың арнайы қондырғысы қолданылды.

Қабаттардың тереңдігі бойынша элементтердің таралуының химиялық құрамы мен профилі PROFILER-2 қондырғысында (Horiba Jobin Yvon, Франция) оптикалық разрядты солғын қуатсыздау (ОРСК) әдісімен анықталды. Құрылған керамикалық-металл нанокұрылымды жабындардың құрылымы мен фазалық құрамының сипаттамаларын зерттеу ДРОН-4 рентгендік дифрактометрiнiң көмегiмен жүзеге асырылды. Микроқұрылымды және элементтік құрамды зерттеу JEOL фирмасының (Жапония) JED-2300 энергиялық-дисперсиялық спектрометриясына арналған приставкасы бар JSM-6700F өрісті эмиссиялық растрлық электрондық микроскоптың көмегімен жүргізілді.

Бірқатар үлгілер үшін жоғары рұқсаттағы мөлдір электронды микроскопия көмегімен зерттеулер жүргізілді. 200 кВ үдеткіш кернеуі бар JEM-2100 (JEOL, Жапония) электронды микроскопы қолданылды. Для определения толщины покрытия на плоской поверхности использовали метод шар шлифа.

Наноиндентирлеу әдісімен қаттылықты (Н) анықтау, сондай-ақ Юнга модулін (Е), серпімді қалпына келтіру дәрежесін (W) және жабындардың икемділік индекcін (Н/Е) өлшеу үшін наноқаттылық өлшегішті қолданды (ЦИСМ ТПУ: NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X, CSEM, Швейцария). Алмазды индентор 1 мин ішінде берілген мәнге дейін (0,8–300 мН) үздіксіз артатын жүктемемен жабын бетіне әсер етеді, содан кейін индентор түсіріледі (2-сурет). Өзгермелі жүктеме ену тереңдігіне және индентор ізінің ауданына бекітіледі. Деректерді талдау белгілі Оливер және Фарр әдісімен жүзеге асырылады [16-140].



h_c – беттің ауытқуын ескере отырып, енгізу тереңдігі, h_f – қалпына келтірілген баспаның тереңдігі, h_{max} – инденторды енгізудің максималды тереңдігі, A_c – беттесу ауданының проекциясы.

2-сурет. Наноиндентация әдісімен қаттылықты өлшеу алгоритмі

Н қаттылығы P_{\max} максималды жүктемесінің A_c бетімен индентордың жанасу проекциясының ауданына қатынасына тең:

$$H = P_{\max} / A_c, \quad (1)$$

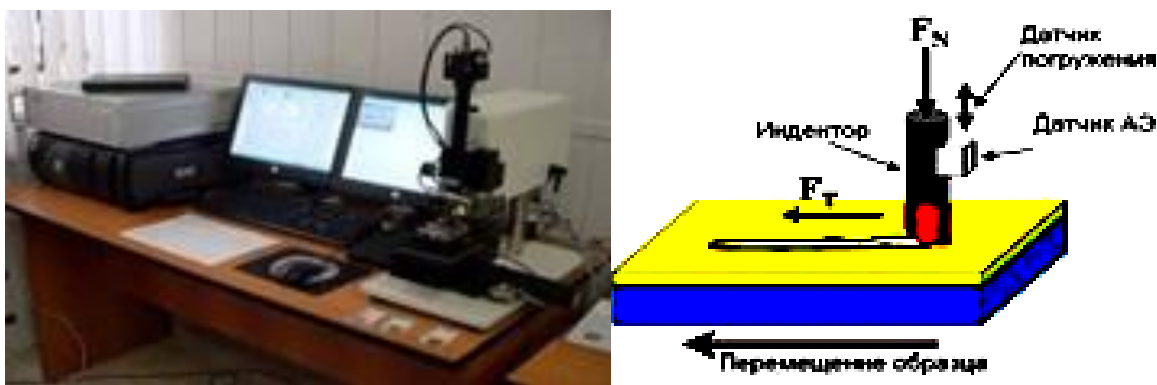
Серпімділік модулі келесі формуладағы түсіру қисығының көлбеуінен шығады:

$$E = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{dh}{dP} \right) \quad (2)$$

Серпімді қалпына келтіру дәрежесі мына формула бойынша анықталады:

$$W = \frac{(h_{\max} - h_0)^2}{h_{\max}} \quad (3)$$

Жабындарды адгезиялық/когезиондық беріктігін анықтау мақсатында сынау үшін «скретч-тестілеуді» (REVETEST. CSM Instruments. Швейцария) қолданды (Сурет 3) [1, б154].



3-сурет. Аспаптың сыртқы түрі және REVETEST құрылғысында адгезиялық/когезиондық беріктігін анықтау схемасы

Нәтижелері. Керамикалық-металлдық нанокұрылымдық жабындыларды наноиндентирлеу.

Жабындардың сипаттамаларын оңтайландыру үшін құрылым мен олардың қасиеттері арасындағы байланысты орнату маңызды міндет болып табылады. Абразивті және жабысқақ тозуға төзімділік үшін нано жабындар жоғары қаттылыққа және серпімді қалпына келтірудің жоғары мәніне ие болуы керек, бұл әсіресе соққы, абразивті және эрозиялық әсер ету жағдайында өте маңызды. Материалдың серпімді сыну деформациясына тұрақтылығын сипаттайтын және икемділік индексі деп аталатын H/E сияқты шаманы жабындардың тозуға төзімділігін бағалау үшін пайдалануға болады. Аса қатты жабындардың икемділік индексі $H/E \approx 0,1$ және одан жоғары болуы тиіс [2]. Ол үшін H қаттылығы жоғары жабынның салыстырмалы түрде төмен серпімді модулі E болуы керек.

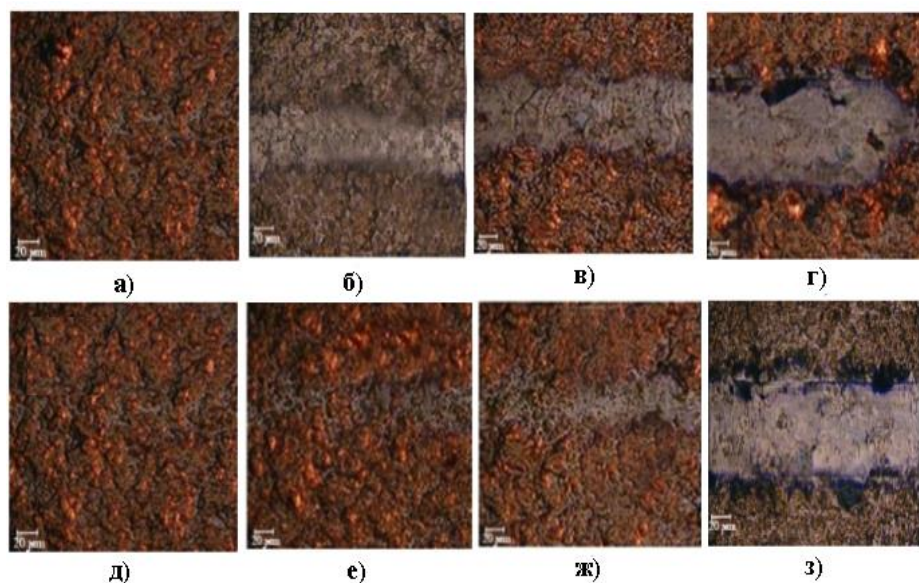
Кесу аймағындағы карбидті құралға қатайтатын жабындардың бұзылуы серпімді де, пластикалық деформациямен де байланысты болуы мүмкін [3], зерттелген КМНЖ-ның сыну кедергісінің белгілі бір бағасын келесі параметрлер негізінде жасауға болады: материалдың серпімді деформацияға төзімділігін бағалау үшін қолданылатын $H/E-1$ [4] және пластикалық деформация материалының кедергісін сипаттайтын $H/E-2$ [5]. Деформацияның белгілі бір түрі басым болған кезде, бұл параметрлерді жабын материалының тозуға төзімділігін бағалау үшін де қолдануға болады. Қатты және пластикалық деформацияға төзімділігі жоғары жабындар төмен серпімді модульде жоғары қаттылыққа ие болуы керек [6]. Жоғарыда көрсетілген H/E параметрлерінің және құр. $Cu-7$ ат.%с және құр. $Cu-14$ ат.% салыстыру жабындарының мәндері 11-кестеде келтірілген.

2-кесте. Мыс құрамы әртүрлі болғанда КМНЖ-ның физикалық-механикалық қасиеттері

№	Пластина	H (ГПа)	E (ГПа)	H ³ /E ²	H/E	W _p , %	μ
1	TiN-Cu-7 ат.% Cu жабындысымен	46	460	0,40	0,10	70	0,40
2	TiN-Cu-14 ат.% Cu жабындысымен	50	512	0,50	0,10	65	0,30

Алынған мәндер TiN-Cu - 14ат.% Cu жабыны бар балқытылған ЭО5 қорытпасының TiN-Cu-7 ат.% Cu жабынымен салыстырғанда, серпімді және пластикалық деформациялар ретінде жоғары кедергісін көрсетеді. Сонымен қатар, 11-кестеде салыстырылатын жабындарды индекстеу кезінде алынған пластикалық деформацияның (W_p) салыстырмалы жұмысын өлшеу нәтижелері келтірілген.

КМНЖ-ның адгезионды-когезионды беріктігі. ЭО5 балқытылған болат төсемдеріндегі жабындардың адгезиялық беріктігін Revetest аспабында скретч-тестілеу арқылы өлшеуге болады. 4-суретте мыс құрамы 7 ат.% және 14 ат.% болатын КМНЖ TiN-Cu бетінің суреттері көрсетілген. КМНЖ үшін құрамында мыс 7 ат.% бар сыни жүктемелердің мәні максималды болды. Алғашқы кішкентай жарықтардың пайда болуы L_{c1} = 9Н кезінде байқалды, жүктеме жоғарылаған кезде бетінде жарықтардың айтарлықтай таралуы байқалмайды. Кішкентай көлденең жарықтар 30 Н аралығындағы жабынның сызаттарының шекарасында байқалады, бірақ олар сызаттың шетінен едәуір қашықтыққа таралмайды және жабынның бұзылуына әкелмейді. Бірлескен жойылу жабынның өсу бағытына перпендикуляр жазықтықта шытынау арқылы пайда болды. Жарықтардың таралуы жабын/төсемше бөлімінің шекарасынан да, созылу кернеулері максималды болатын сызаттардың шетінен де кетуі мүмкін. Деформация кезіндегі қисықтық радиусы сызаттардың шеттерінде минималды, ал осы аймақтағы созылу кернеулері максималды, көбінесе нанокұрылымды жабындардың біріккен бұзылуы осы аймақтан басталады. Жабынның бірлескен бұзылуымен байланысты шытынаудың алғашқы пайда болуы L_{c2} ≈ 20Н кезінде тіркелді. Алайда, шытынаудың пайда болуы жалғыз болғанын ескеру керек; әдетте, 35Н жүктемелерінде шытынаудың пайда болуы байқалды. 55 Н жүктемеде адгезияның бұзылу белгілері байқалмайды. Жабындама үшін L_{c3} ≈ 35Н жүктеме кезінде субстратқа алғашқы шытынау белгілері тіркелді. Қаптаманың субстратқа бөлек деляминациясы сызаттардың шеттерінде де анықталды. Мыс құрамы 14 ат.%-бен жабынды сынау кезінде басқа сурет байқалады.



4-сурет. Қаптау бетіндегі сызаттардың суреттері

Адгезия бұзылу басталғанға дейін жабындардың бетінде іс жүзінде жарықтар, чиптер немесе жергілікті когезиялық сынықтар байқалмады. Жабынға арналған L_{c3} критикалық жүктемесі, мыс мөлшері 7 ат.%. -дан тұратын жабынға қарағанда айтарлықтай төмен болды. Қаптау үшін сыни жүктеме $L_{c3} \approx 35$ Н болды.

Құрамында мыс 7 ат.% болғанда TiN-Cu инденторға жүктеме кезінде: 9Н (а); 20 Н (б); 35 Н (в); 55 Н (г); және құрамында мыс 14 ат.% болғанда инденторға жүктеме кезінде: 9Н (д); 20 Н (е); 35 Н (ж); 55 Н (з)

Қабатталу сипатына сүйене отырып, ығысу кернеулері бұзылуға негізгі үлес қосады деп болжауға болады. 4-суретте жүктеме жоғарылаған сайын жабындар негізінен сызаттардың шетінде жойылады, яғни жабынды төсемше материалына үлкен қысыммен сызаттардың жиектеріндегі қысу және созылу кернеулері бұзылуда маңызды рөл атқара бастайды. Бұл зерттелген жабындардың наноөлшемді құрылымымен түсіндіріледі, бұл дәнше шекараларының тармақталған желісі арқылы сызаттың өсуін тежеуге, сондай-ақ КМНЖ материалының тұтқырлығын сақтауға көмектеседі.

Қорытынды. Наноинденттеу қасиеттерін зерттеу барысында TiN-Cu жабындының алынған мәндері - 14ат.% Cu жабыны бар балқытылған ЭО5 қорытпасының TiN-Cu-7 ат.% Cu жабынымен салыстырғанда, серпімді және пластикалық деформациялар ретінде жоғары кедергісін көрсетеді.

Бұл зерттелген жабындардың наноөлшемді құрылымымен түсіндіріледі, бұл дәнше шекараларының тармақталған желісі арқылы сызаттың өсуін тежеуге, сондай-ақ КМНЖ материалының тұтқырлығын сақтауға көмектеседі. Құрамында мыс 7 ат.% болғанда TiN-Cu инденторға жүктеме кезінде: 9Н (а); 20 Н (б); 35 Н (в); 55 Н (г); және құрамында мыс 14 ат.% болғанда инденторға жүктеме кезінде: 9Н (д); 20 Н (е); 35 Н (ж); 55 Н (з).

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Knotek O., Löffler F., Krämer G. // Surface and Coatings Technology. 1992. V.54-55. – 476 p.
- [2] Блинков, И.В. Наноструктурирование и модифицирование свойств вакуумнодуговых покрытий TiN введением в их состав никеля [Текст] И.В. Блинков, А.О. Волхонский, Д.С. Белов, В.И. Блинков, Е.А. Скрялёва, Н.В. Швындина; Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 163–170.
- [3] ESCA studies of some copper and silver selenides [Текст] / A. Romand, M. Roubin, J.P. Deloume // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 1978. – Vol. 13. – P. 229–242.
- [4] Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties [Текст] / J. Musil, J. Vlcek // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 142–144. – P. 557–566.
- [5] Handbook of Thin Film Materials. Vol.1: Deposition and Processing of Thin Films [Текст] / H.S. Nalwa // Marcell Dekker Inc., N.Y., USA, 2002.
- [6] On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior [Текст] / A. Leyland, A. Matthews // Wear. – 2000. – Vol. 246. – P. 1–11.
- [7] Фортуна С.В., Шаркеев Ю.П. Особенности микроструктуры монослойных нитридных покрытий //Физическая мезомеханика. - 2000, 3. – С. 29-35.
- [8] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Елисеев А.Н. Проблема качества износостойких покрытий //Научное издание МГТУ им. Баумана. -2014. – с. 78-83.

REFERENCES

- [1] Knotek O., Löffler F., Krämer G. // Surface and Coatings Technology. 1992. V.54-55. – 476 p.
- [2] Blinkov, I.V. Nanostrukturirovanie i modifitsirovanie svoistv vauumnodugovykh pokrytii TiN vvedeniem v ikh sostav nikelya [Tekst] I.V. Blinkov, A.O. Volkhonskii, D.S. Belov, V.I. Blinkov, E.A. Skryleva, N.V. Shvyndina; Neorganicheskie materialy. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 163–170.
- [3] ESCA studies of some copper and silver selenides [Tekst] / A. Romand, M. Roubin, J.P. Deloume // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 1978. – Vol. 13. – P. 229–242.
- [4] Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties [Tekst] / J. Musil, J. Vlcek // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 142–144. – P. 557–566.

[5] Handbook of Thin Film Materials. Vol.1: Deposition and Processing of Thin Films [Текст] / H.S. Nalwa // Marcell Dekker Inc., N.Y., USA, 2002.

[6] On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior [Текст] / A. Leyland, A. Matthews // Wear. – 2000. – Vol. 246. – P. 1–11.

[7] Fortuna S.V., Sharkeev Yu.P. Osobennosti mikrostruktury monosloinykh nitridnykh pokrytii //Fizicheskaya mezhmekhanika. - 2000, 3. – S. 29-35.

[8] Abashin M.I., Galinovskii A.L., Eliseev A.N. Problema kachestva iznosostoikikh pokrytii //Nauchnoe izdanie MGTU im. Baumana. -2014. – s. 78-83.

¹Р.Ж. Абуова*, ²Э.Б. Тен

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия

*e-mail: ryskena@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХРОМОНИКЕЛЕВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ С КЕРАМИКО-МЕТАЛЛИЧЕСКИМ (TiN-CU) НАНОСТРУКТУРНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация. В данной статье рассматривается исследование наноиндентации, скретч-тестирования керамико-металлического наноструктурного покрытия на выплавленных хромоникелеванадиевых сталях. Методом наноиндентации, а именно анализ механического отклика поверхности покрытия TiN-Cu на вдавливание наносенсора атомно-силового микроскопа (АСМ) используют для непосредственного наблюдения таких явлений, как появление дислокаций, возникновение сдвиговой нестабильности, фазовых переходов и т.д. Методом скретч-тестирования изучены механизмы разрушения покрытия TiN-Cu, нанесенные на подложки в виде выплавленных новых образцов ЭО5 с разным содержанием меди (7%,14%). Показано, что разрушение покрытий начинается с образования трещин в вершинах навалов, которые образуются вдоль царапин вследствие пластического оттиснения материала подложки. При каждом увеличении нагрузки к индентору характер разрушения меняется.

Ключевые слова: шестерни, втулки, разряд дуги, катод, индентор, трение.

¹R. Abuova*, ²E.B. Ten

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Moscow Institute of Steel And Alloys, Moscow, Russia

*e-mail: ryskena@mail.ru

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMONICELEVANADIUM STEELS WITH CERAMIC-METALLIC (TiN-CU) NANOSTRUCTURAL COATING USED IN MACHINE BUILDING

Abstract. This article examines the study of nanoindentation, scratch testing of a ceramic-metal nanostructured coating TiN-Cu on melted chromium-nickel-vanadium steels. The nanoindentation method, namely, the analysis of the mechanical response of the TiN-Cu coating surface to the indentation of the atomic force microscope (AFM) nanosensor, is used for direct observation of such phenomena as the appearance of dislocations, the occurrence of shear instability, phase transitions, etc. The mechanisms of destruction of the TiN-Cu coating deposited on substrates in the form of melted new EO5 samples with different copper (7%,14%) content were studied by the method of scratch testing. It is shown that the destruction of coatings begins with the formation of cracks in the tops of the piles, which are formed along the scratches due to plastic impression of the substrate material. With each increase in the load on the indenter, the nature of the destruction changes.

Keywords: gears, bushings, arc discharge, cathode, indenter, friction.